

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

**FACULTA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA,  
METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**

**UNIDAD DE POSGRADO**

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA  
CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN A  
ESCALA LABORATORIO PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUA”**

**TESIS**

**Para optar el Grado Académico de Magíster en Ciencias Ambientales con Mención en Control  
de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental**

**AUTOR**

**Edwar Alejandro Aguilar Ascon**

**Lima – Perú**

**2015**

## **DEDICATORIA**

A Dios quién supo guiarme por el buen camino y darme fortaleza ante las adversidades que se presentan en la vida.

A la memoria de mi madre quien con su ejemplo me enseñó a ser una mejor persona cada día.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto de Investigación Científica de la Universidad de Lima, por ser la institución quien promovió y patrocinó en su integridad todo el desarrollo de este proyecto.

A mi señora y toda mi familia por su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Al Laboratorio de Investigación del Agua de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería por prestar sus instalaciones para realizar pruebas de laboratorio.

## INDICE GENERAL

	Pág.
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCION</b>	01
1.1 Situación problemática	01
1.2 Formulación del Problema	02
1.2.1 Problema general	02
1.2.2 Problemas específicos	02
1.3 Justificación de la investigación	03
1.4 Objetivos	04
1.4.1 Objetivo general	04
1.4.2 Objetivos específicos	04
1.5 Hipótesis y variables	05
1.5.1 Hipótesis general	05
1.5.2 Hipótesis específicas	05
1.5.3 Operacionalización de las variables	06
1.5.4 Matriz de consistencia	07
 <b>CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO</b>	 08
2.1 Antecedentes del problema	08
2.2 Bases Teóricas	10
2.2.1 Aguas Residuales	10
2.2.2 Coagulación Química	14
2.2.3 Electrocoagulación	17
2.2.4 Mecanismos del proceso de electrocoagulación	18
2.2.5 Reacciones presente en el proceso de electrocoagulación	20
2.2.6 Factores que afectan al proceso de electrocoagulación	22
2.2.7 Reactores para procesos de electrocoagulación	25
2.2.8 Ventajas de la electrocoagulación	31
2.2.9 Aplicaciones de la electrocoagulación	33
2.2.10 Lodo del proceso de electrocoagulación	34

<b>2.3 Bases Conceptuales</b>	
<b>2.4 Marco Legal</b>	<b>37</b>
<b>CAPITULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	<b>40</b>
<b>3.1 Diseño y construcción de la celda de electrocoagulación</b>	<b>40</b>
3.1.1 Dimensionamiento de la celda	40
3.1.2 Materiales, reactivos y equipos utilizados en el laboratorio	44
<b>3.2 Ensayos de laboratorio preliminares</b>	<b>46</b>
3.2.1 Pruebas con agua de grifo	46
3.2.2 Ensayos con agua residual sintética preparada en laboratorio	47
<b>3.3 Caracterización físico-química y biológica del efluente</b>	<b>49</b>
<b>3.4 Ensayos de laboratorio definitivos</b>	<b>51</b>
3.4.1 Ensayo A pH = 7.12	51
3.4.2 Ensayo B pH = 4	52
3.4.3 Ensayo C pH = 10	52
<b>3.5 Ensayos adicionales</b>	<b>54</b>
3.5.1 Lodo del proceso de electrocoagulación	54
3.5.2 Lodo del proceso físico químico convencional	55
<b>CAPITULO 4: ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS</b>	<b>57</b>
<b>4.1 Resultados de agua residual sintética</b>	<b>57</b>
<b>4.2 Resultados de los ensayos definitivos</b>	<b>59</b>
4.2.1 Resultados Ensayo A pH = 7.12	59
4.2.2 Resultados Ensayo B pH = 4	61
4.2.3 Resultados Ensayo C pH = 10	63
<b>4.3 Aluminio residual en el efluente tratado</b>	<b>65</b>
<b>4.4 Variación del pH, conductividad y temperatura</b>	<b>65</b>
4.4.1 Variación del pH	65
4.4.2 Variación de la conductividad	67
4.4.3 Variación de la temperatura	68

<b>4.5 Lodo del proceso de electrocoagulación</b>	<b>65</b>
4.5.1 Comparación de lodos electrocoagulación y físico químico	70
<b>4.6 Evaluación Económica del tratamiento</b>	<b>71</b>
<b>4.7 Diseño Experimental</b>	<b>72</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>76</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>78</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>79</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>81</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Contaminantes de importancia en el tratamiento de las aguas residuales	12
<b>Tabla 2.</b>	Procesos unitarios según la etapa de tratamiento	14
<b>Tabla 3.</b>	Características de los lodos	35
<b>Tabla 4.</b>	Anexo N° 1 Valores Máximos Admisibles	38
<b>Tabla 5.</b>	Anexo N° 2 Valores Máximos Admisibles <sup>(1)</sup>	39
<b>Tabla 6.</b>	Análisis físico químicos y biológicos del efluente	50
<b>Tabla 7.</b>	Condiciones iniciales del efluente pH = 7.12	51
<b>Tabla 8.</b>	Condiciones iniciales del efluente pH=4	52
<b>Tabla 9.</b>	Condiciones iniciales del efluente pH = 10	52
<b>Tabla 10.</b>	Condiciones iniciales del agua sintética	57
<b>Tabla 11.</b>	Remoción de la turbiedad en función del tiempo (Agua sintética)	57
<b>Tabla 12.</b>	Resultados de la DQO en función a la intensidad de corriente y el tiempo pH=7.12	59
<b>Tabla 13.</b>	Resultados de la DQO en función a la intensidad de corriente y el tiempo pH=4	61
<b>Tabla 14.</b>	Resultados de la DQO en función a la intensidad de corriente y el tiempo pH=10	63
<b>Tabla 15.</b>	Resultados de la concentración de aluminio y fierro en el efluente	65
<b>Tabla 16.</b>	Condiciones de operación para las mediciones del pH	66
<b>Tabla 17.</b>	Valores del pH respecto al tiempo	66

<b>Tabla 18.</b>	Condiciones de operación en mediciones de la conductividad	67
<b>Tabla 19.</b>	Valores de la conductividad respecto al tiempo	67
<b>Tabla 20.</b>	Condiciones de operación en mediciones de la temperatura	69
<b>Tabla 21.</b>	Valores de temperatura con respecto al tiempo	69
<b>Tabla 22.</b>	Porcentaje de humedad de lodos	71
<b>Tabla 23.</b>	Parámetros óptimos en la evaluación económica	72
<b>Tabla 24.</b>	Calculo de costos de reposición de electrodos	73
<b>Tabla 25.</b>	Análisis estadístico ANOVA de los datos experimentales	75



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Coagulación	15
<b>Figura 2.</b>	Esquema de una celda electrocoagulación	20
<b>Figura 3.</b>	Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo	27
<b>Figura 4.</b>	Reactor con electrodos monopolares conectados en serie	27
<b>Figura 5.</b>	Reactor con electrodos bipolares conectados en paralelo	28
<b>Figura 6.</b>	Reactores por el tipo de flujo	29
<b>Figura 7.</b>	Reactores filtro prensa	29
<b>Figura 8.</b>	Reactor de electrodo cilíndrico rotativo	30
<b>Figura 9.</b>	Reactor de lecho fluidizado	31
<b>Figura 10.</b>	Dimensiones de la celda de electrocoagulación	41
<b>Figura 11.</b>	Colocacion de electrodos de fierro y aluminio	42
<b>Figura 12.</b>	Cortado de electrodos de aluminio y fierro	42
<b>Figura 13.</b>	Diagrama de equipo de electrocoagulación	43
<b>Figura 14.</b>	Equipo de electrocoagulación	43
<b>Figura 15.</b>	Turbidímetro HACH	45
<b>Figura 16.</b>	Reactor DQO HACH	45
<b>Figura 17.</b>	Colorímetro DR-980 HACH	45
<b>Figura 18.</b>	Medidor Conductividad y pH	45
<b>Figura 19.</b>	Pruebas con agua de grifo	46
<b>Figura 20.</b>	Pruebas de transferencia de corriente	47
<b>Figura 21.</b>	Burbujas de H <sub>2</sub>	47

<b>Figura 22.</b>	Agua sintética preparada en el laboratorio 660 UNT	48
<b>Figura 23.</b>	Llenado del equipo	48
<b>Figura 24.</b>	Toma de muestra final	48
<b>Figura 25.</b>	Imagen del efluente crudo	50
<b>Figura 26.</b>	Inicio del tratamiento	53
<b>Figura 27.</b>	A 5 min de tratamiento	53
<b>Figura 28.</b>	A 10 min de tratamiento	53
<b>Figura 29.</b>	Formación de lodos	53
<b>Figura 30.</b>	A 15 min de tratamiento	53
<b>Figura 31.</b>	Efluente inicial y final	53
<b>Figura 32.</b>	Inicio de tratamiento	54
<b>Figura 33.</b>	Formación de lodo	54
<b>Figura 34.</b>	Lodo final del tratamiento	54
<b>Figura 35.</b>	Equipo de prueba de jarras	56
<b>Figura 36.</b>	A 15 minutos de tratamiento	56
<b>Figura 37.</b>	Finalización de la prueba	56
<b>Figura 38.</b>	Lodo del tratamiento físico químico	56
<b>Figura 39.</b>	Variación de la turbiedad respecto al tiempo (Agua sintética)	58
<b>Figura 40.</b>	Porcentaje remoción de turbiedad respecto al tiempo (Agua sintética)	58
<b>Figura 41.</b>	Variación de la DQO en función del tiempo, la intensidad de corriente pH =7.12	60

<b>Figura 42.</b>	Porcentaje de remoción de DQO en función del tiempo, intensidad de corriente y $\text{pH}=7.12$	60
<b>Figura 43.</b>	Variación de la DQO en función del tiempo, la intensidad de corriente y $\text{pH}=4$	62
<b>Figura 44.</b>	Porcentaje de remoción de DQO en función del tiempo, intensidad de corriente y $\text{pH}=4$	62
<b>Figura 45.</b>	Variación de la DQO en función del tiempo, la intensidad de corriente y $\text{pH}=10$	64
<b>Figura 46.</b>	Porcentaje de remoción de DQO en función del tiempo, Intensidad de Corriente y $\text{pH}=10$	64
<b>Figura 47.</b>	Variación del $\text{pH}$ vs Tiempo	66
<b>Figura 48.</b>	Variación de la conductividad vs tiempo	68
<b>Figura 49.</b>	Variación de la temperatura vs tiempo	69
<b>Figura 50.</b>	Lodo residual del efluente industrial	70

## RESUMEN

La contaminación causada por el uso del agua en muchas de las actividades del ser humano, nos lleva a la necesidad de utilizar nuevas tecnologías para remoción de contaminantes de las aguas residuales, una de ellas es la electrocoagulación. En este estudio se planteó construir un reactor de electrocoagulación para evaluar la eficiencia en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) de aguas residuales provenientes de la industria de pintura; así como determinar las mejores condiciones de pH, conductividad, intensidad de corriente y tiempo de tratamiento. En base a los resultados obtenidos al realizar el tratamiento del efluente con electrocoagulación, se determinó una eficiencia promedio del 87 % en la remoción de la DQO. Estos valores óptimos de operación se obtuvieron con una intensidad de corriente  $I = 5$  amperios, con el pH natural del efluente de 7,12 y un tiempo de tratamiento de 15 minutos, con lo cual se cumple la normativa ambiental vigente en el país. Otro aspecto importante observado en este estudio fue la calidad del lodo producido en el tratamiento, de aspecto mucho más compacto que un lodo físico químico o biológico.

**Palabras clave:** electrocoagulación, electrodos, tratamiento de agua.

## ABSTRACT

The pollution caused by the use of water in many activities of human beings, has taken us to the need of using new technologies to the removal of contaminants from wastewater, one of them is the electrocoagulation. In this research we suggest the construction of an electrocoagulation reactor to evaluate the efficiency in the removal of COD (Chemical Oxygen Demand) from wastewater coming from the painting industry; it also wants to determine the best conditions of pH, conductivity, electric intensity and time of treatment. Based on the results we've gotten in the treatment of effluent with electrocoagulation, we determined an average efficiency in the 87 % of COD removal. This optimum ranges were gotten with an electrical intensity of  $I = 5$  amperes, with the natural pH of the effluent in 7,12 and a 15 minutes treatment time, with which we accomplish the environmental compliance of the country. Other important aspect we've seen in this research was the quality of the sludge produced in the treatment, with much more compact appearance than a physicochemical or biological sludge.

**Keywords:** electrocoagulation, electrodes, water treatment.

## **CAPITULO 1: INTRODUCCION**

### **1.1 Situación problemática.**

En la actualidad el uso indiscriminado del agua ha generado una escasez de este vital líquido, entre otros factores al aumento de la población, a los contaminantes en los cuerpos de agua y su utilización en los procesos industriales. Debido a esto se debe realizar diversos procesos de tratamiento para recuperar esta agua y satisfacer las necesidades de la población.

En general las plantas de tratamiento de agua en el país están basadas en tecnologías convencionales como el tratamiento físico químico el cual utiliza coagulantes primarios como el Sulfato de Aluminio o Sales de hierro para el proceso de coagulación y polímeros sintéticos los cuales pueden ser contaminados durante su proceso de fabricación con monómeros u otras sustancias tóxicas, entre las cuales se encuentra la acrilamida y de ahí pueden reaccionar con las demás sustancias químicas añadidas al agua durante su tratamiento, como tal es el caso del ozono y del cloro, generando sustancias peligrosas para la salud. (Pérez Carrión, 1992). Otro tipo de tratamiento muy difundido en el país es el biológico (lodos activados), y si bien es cierto es eficiente presenta un elevado costo en su operación y mantenimiento, además de ser muy sensible ya que la depuración de las aguas es realizada por bacterias las cuales dependen de determinadas condiciones de pH y carga orgánica.

Es por ello la necesidad de buscar nuevas tecnologías que permitan tratar los efluentes industriales de todo tipo y puedan cumplir la normativa ambiental vigente en el país “Valores Máximos Admisibles” D.S. N° 021-2009-VIVIENDA para los desagües industriales, la cual reglamenta y sanciona a las industrias que incumplan esta norma.

## **1.2 Formulación del problema.**

Ante la problemática descrita anteriormente, una solución es la electrocoagulación, la cual es una tecnología de muy poca aplicación en el país, que tiene como ventajas no usar coagulantes como el sulfato de aluminio, así como polímeros sintéticos los cuales encarecen los costos del tratamiento. Es por ello que su utilización en el tratamiento de agua se hace necesaria e imprescindible teniendo en cuenta las realidades socio-económicas de nuestro país.

En este sentido la presente investigación pretende utilizar la electrocoagulación como una tecnología de tratamiento de agua residual proveniente de la industria, minimizando el empleo de coagulantes sintéticos, reduciendo los impactos ambientales y esperando obtener una mejor calidad de agua tratada ya sea para cumplir la normativa ambiental vigente o para ser reutilizada en sus procesos industriales.

### **1.2.1 Problema general.**

Este documento pretende analizar, ¿Cuál es la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de aguas?

### **1.2.2 Problemas específicos.**

¿Cuál es la eficiencia en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) mediante el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de agua?

¿Cuál es la influencia del pH, Intensidad de corriente y tiempo en el tratamiento de agua con electrocoagulación?

### 1.3 Justificación de la investigación.

En nuestro país se utiliza tradicionalmente tecnologías convencionales para el tratamiento de aguas residuales industriales, una de ellas el proceso físico químico, basada en el uso de coagulantes como el Sulfato de Aluminio y polímeros sintéticos (policloruro de aluminio), así como algunas sales de fierro. Este proceso utiliza grandes cantidades de productos químicos los cuales encarecen el tratamiento, , además en algunas plantas de tratamiento no se aplica la dosis óptima de estos coagulantes o polímeros, realizando una sobredosificación de estos productos y su uso indiscriminado puede incrementar la concentración de aluminio en el agua tratada; ocasionando problemas para la salud.

Un aspecto importante en tener en cuenta es la gran cantidad de lodos producidos por este tratamiento y por su alto porcentaje de humedad son difíciles de tratar para su disposición final.

Otra tecnología muy difundida en el país es el tratamiento por lodos activados, la cual es un proceso que básicamente es realizada por bacterias las cuales degradan la materia orgánica, es por ello que son muy sensibles ya que están sujetas a determinadas condiciones óptimas para buen funcionamiento y solo sirve para algunos efluentes industriales.

Con la finalidad buscar una solución al problema existente se justifica la necesidad en esta investigación buscar nuevas alternativas en el tratamiento de aguas en el país, siendo una de estas la electrocoagulación, la cual es una tecnología que no utiliza coagulantes químicos, ya que con cargas eléctricas desestabiliza las partículas coloidales permitiendo su aglomeración y precipitación, produciendo la depuración del agua contaminada, además de ser mucho más versátil y permite tratar todo tipo de efluentes industriales, lo cual nos permite alcanzar altos porcentajes en la remoción de contaminantes presentes en el agua logrando así el cumplimiento de la normativa ambiental vigente en el país.



## **1.4 Objetivos.**

### **1.4.1 Objetivo general.**

Determinar la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de aguas.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- a. Determinar la eficiencia en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) mediante el proceso de electrocoagulación.
- b. Hallar la influencia del pH, Intensidad de corriente y el tiempo en el tratamiento de agua en el proceso de electrocoagulación.

## **1.5 Hipótesis y variables**

### **1.5.1 Hipótesis general.**

Es eficiente una celda de electrocoagulación a escala laboratorio en el tratamiento de aguas.

### **1.5.2 Hipótesis específicas.**

**Hipótesis 1:** Es eficiente la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) el proceso de electrocoagulación en el tratamiento de agua.

**Hipótesis 2:** Influye el pH, la intensidad de corriente y el tiempo en el tratamiento de aguas con electrocoagulación

### **1.5.3 Operacionalización de las variables**

#### **Variable Independiente general**

Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación.

#### **Variable dependiente**

Tratamiento de agua

#### **Variable Independiente específica 1**

Es eficiente en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno)

#### **Variable Independiente específica 2**

Influencia del pH, la intensidad de corriente y el tiempo en la electrocoagulación.

### OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

Hipótesis	Variables	Conceptos	Indicadores	Técnicas
<u>Hipótesis General</u>  Es eficiente una celda de electrocoagulación a escala laboratorio en el tratamiento de agua	<u>Variable independiente</u>  Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación	Se constituye en la estimación del rendimiento de un equipo.	Porcentaje de eficiencia	Mediciones con equipos al inicio y al final.
	<u>Variable dependiente</u>  Tratamiento de agua.	Es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico-químico o biológico cuya finalidad es la reducción de la contaminación en el agua.	Normativa Ambiental VMA  Características del agua residual.	Verificación de los parámetros en la Norma.  Análisis de Laboratorio.
<u>Hipótesis específica 1</u>  Es eficiente en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) del proceso de electrocoagulación en el tratamiento de agua.	<u>Variable independiente</u>  Es eficiente en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno)	Estimación del rendimiento en la remoción de la DQO.	DQO (Demanda Química de Oxígeno)	Análisis de DQO.
	<u>Variable independiente</u>  Tratamiento de agua.	Es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico-químico o biológico cuya finalidad es la reducción de la contaminación en el agua.	Normativa Ambiental VMA  Características del agua residual	Verificación de los parámetros en la Norma.  Análisis de Laboratorio.
<u>Hipótesis específica 2</u>  Influye el pH, la intensidad de corriente y el tiempo en el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de agua.	<u>Variable independiente</u>  Influencia del pH, la intensidad de corriente y el tiempo en la electrocoagulación.	Parámetros fundamentales que influyen en el proceso de electrocoagulación.	pH : Potencial Hidrogeno  Intensidad de Corriente  Tiempo	Mediciones con pH-i-metro, conductímetro y pinza amperimétrica.
	<u>Variable dependiente</u>  Tratamiento de agua.	Es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico-químico o biológico cuya finalidad es la reducción de la contaminación en el agua.	Normativa Ambiental VMA  Características del agua residual	Verificación de los parámetros en la Norma.  Análisis de Laboratorio.

### **MATRIZ DE CONSISTENCIA**

<b>Problema</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Variables</b>	<b>Indicadores</b>
¿Cuál es la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de aguas?	Determinar la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de aguas.	<u>Hipótesis General</u>  Es eficiente una celda de electrocoagulación a escala laboratorio en el tratamiento de agua	<u>Variable independiente</u> Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación	Porcentaje de eficiencia
			<u>Variable dependiente</u> Tratamiento de aguas.	Normativa Ambiental VMA  Características del agua residual
¿Cuál es la eficiencia en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) mediante el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas?	Determinar la eficiencia en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) mediante el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas.	<u>Hipótesis específica 1</u>  Es eficiente en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) del proceso de electrocoagulación en el tratamiento de agua.	<u>Variable independiente</u> Es eficiente en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno)	DQO (Demanda Química de Oxígeno)
			<u>Variable independiente</u> Tratamiento de aguas.	Normativa Ambiental VMA, características del agua residual.
¿Cuál es la influencia del pH, Intensidad de corriente y el tiempo en el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas?	Determinar la influencia del pH, Intensidad de corriente y el tiempo en el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas.	<u>Hipótesis específica 2</u>  Influye el pH, la intensidad de corriente y el tiempo en el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas.	<u>Variable independiente</u> Influencia del pH, la intensidad de corriente y el tiempo en la electrocoagulación.	pH : Potencial Hidrogeno, Intensidad de Corriente, tiempo.
			<u>Variable dependiente</u> Tratamiento de agua.	Normativa Ambiental VMA  Características del agua residual

## CAPITULO 2: MARCO TEORICO

### 2.1 Antecedentes del problema.

#### **Antecedente 1:**

**Título:** Propuesta técnica a escala piloto para la remoción de color de origen textil, por medio de electrocoagulación para favorecer el proceso de potabilización del agua, en una planta de tratamiento de aguas.

**Autor:** Erick Estuardo Pinzón Gamboa

**Institución:** Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Año:** 2010.

#### **Resumen:**

En esta investigación se buscó determinar la viabilidad técnica de utilizar la electrocoagulación para eliminar contaminación de colorantes de origen textil del río Xayá, el cual se utiliza en la distribución de agua potable para la ciudad de Guatemala. Se discuten las ventajas y desventajas que tiene este método, planteando el diseño y operación del reactor. Desde este punto de vista, la electrocoagulación se convierte en un proceso electroquímico que puede tener resultados exitosos en su aplicación optimizando los factores que lo conforman.

#### **Antecedente 2.**

**Título:** Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea.

**Autoras:** Álvaro Arango Ruiz

Luis Fernando Garcés Giraldo

**Institución:** Universidad EAFIT de Colombia.

**Año:** 2007.

**Resumen:**

El sistema de electrocoagulación juega un papel muy importante en la efectividad de remoción de contaminantes. Algunos aspectos de diseño a tener en cuenta están relacionados con la celda, los electrodos, los materiales de este, la geometría y la disposición de los electrodos son fundamentales para que la aplicación de la electrocoagulación tenga resultados óptimos. La investigación permitió establecer la geometría tanto de la celda como de los electrodos, materiales y tipo de conexión, adicionalmente determinar los parámetros eléctricos de la fuente de voltaje.

**Antecedente 3.**

**Título:** Remoción de microorganismos patógenos de las aguas mediante Electrocoagulación empleando ánodos de Aluminio

**Autoras:** Daniel Alonso Gamero Quijano

**Institución:** Universidad Nacional de Ingeniería

**Año:** 2011.

**Resumen:**

El Gran parte de los ríos y lagunas, así como otros cuerpos receptores de los vertidos acuosos de origen urbano e industriales se encuentran infectados por diversos tipos de bacterias unas más nocivas que otras, siendo causantes de diversas enfermedades. Estudios realizados demuestran que la desinfección electroquímica mediante la técnica de electrocoagulación puede remover una amplia variedad de microorganismos, virus y algas. Los factores de pH, concentración de aluminio, densidad de corriente y tiempo de electrólisis fueron estudiados para la optimización del proceso. La eficiencia de la remoción de microorganismos patógenos fue evaluada utilizando cultivos de 3 tipos de bacterias (i) *Escherichia coli*; (ii) *Pseudomona aureginosa* y (iii) *Staphylococcus aureus*, obteniendo la relación Aluminio-Bacteria para futuros trabajos de investigación.

## 2.2 Bases Teóricas

### 2.2.1 Aguas Residuales

Las aguas residuales provienen de su utilización en las diversas actividades domésticas e industriales del ser humano. Si son de origen domestico presentan características diferenciadas con las aguas residuales provenientes de la actividad industrial, aunque en algunas ocasiones puntuales pueden ser semejantes. Esto ocasiona un problema ambiental, por lo cual es necesario tratarlas con diversos procesos para evitar la contaminación de los cuerpos de agua.

Así, de acuerdo con su origen, las aguas residuales pueden ser clasificadas como:

**Aguas residuales domésticas:** Las aguas residuales domesticas provienen de áreas residenciales y de actividades de tipo doméstico, de establecimientos comerciales y de instituciones tales como hospitales, escuelas, universidades, edificios, etc. Estas se originan básicamente en la cocina, baños y la lavandería, independientemente hay actividades en estos establecimientos e instituciones que generan aguas residuales catalogables como industriales y hasta tóxicos.

**Aguas residuales industriales:** Las aguas residuales industriales las constituyen los desechos líquidos provenientes de una fábrica o empresa que produce cualquier clase de material o artículo sometido a oferta y demanda en el mercado y son diferentes de las aguas de suministros utilizadas por el establecimiento en sus procesos de producción. Aquí pueden incluirse algunas corrientes generadas en el comercio y los hospitales o similares.

**Aguas pluviales:** Las aguas lluvias son las originadas por el escurrimiento superficial de las lluvias (escorrentía) que fluyen desde los techos, calles, jardines, y demás superficies del terreno, algunas de las cuales van al sistema de drenaje y son conducidas por la red de alcantarillado. Se debe tener en cuenta y hacer la especificación, si durante la caracterización se

presentaron lluvias, dado que estas diluyen y afectan la representatividad de la muestra en el caso de mezclarse con alguna de las descargas.

La naturaleza de estas aguas varía de acuerdo con su procedencia de zonas urbanas, rurales, semi-rurales y zonas dentro de las cuales se presenta enormes variaciones según el tipo de actividad o uso del suelo que se tenga. (BID, 2005)

### **Contaminantes de Importancia en el Agua Residuales**

El agua residual contiene muchos contaminantes, para su determinación existen métodos de análisis cuantitativos los que sirven para hallar de la composición química del agua residual, así como análisis cualitativos para conocer las características físicas y biológicas. En la tabla 1 resumimos estos contaminantes.



**Tabla 1.** Contaminantes de importancia en el tratamiento de las aguas residuales

<b>Contaminantes</b>	<b>Razón de la importancia</b>
Sólidos en Suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno).
Patógeno	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carsinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. ejemplos típicos son los agentes tenso activos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.

**Fuente:** (Metcalf & Eddy, 1996)

## **Tratamiento de aguas residuales**

Actualmente existen muchas variedades y tipos de tratamiento de aguas residuales, cada uno de estos se podría decir que es aplicable de acuerdo a la características físico química y biológicas del efluente a tratar, no es lo mismo un efluente domestico que un efluente industrial, los dos presentan muchas diferencias en su composición por lo tanto la elección del tipo de tratamiento a realizar se determina de acuerdo a sus características.

El agua residual de procedencia domestico generalmente se puede realizar con tratamiento biológicos, debido a la materia orgánica presente en su composición, por ende son muy biodegradables permitiendo que las bacterias que son fundamentales en los procesos biológicos puedan degradar esta materia orgánica. No obstante se puede utilizar otro tipo de tratamiento eso dependerá de la calidad de agua esperada a obtener, evaluación económica y su viabilidad del proyecto.

Por otro lado el agua residual industrial, generalmente no contiene muchos componentes que sean biodegradables por lo tanto no es factible aplicar un proceso biológico si no un proceso físico químico. Sin embargo hay industrias que si producen altas cargas de materia orgánica biodegradable, esta puede ser tratada con un proceso biológico o la combinación de ambos para obtener mejores resultados.

## **Clasificación del tratamiento de aguas residuales**

Para la reducción de la contaminación de aguas residuales existen procesos físicos, químicos y biológicos, estos de acuerdo a las necesidades del efluente, se pueden utilizar de forma individual o combinados, a continuación haremos una explicación de cada uno de ellos. (Metcalf & Eddy, 1996).

**Tabla 2.** Procesos unitarios según la etapa de tratamiento

<b>Tipo de tratamiento</b>	<b>Operaciones o procesos unitarios</b>
Preliminares	Dilaceración, desbaste, filtración, flotación, remoción por gravedad, tanque Imhoff, filtración por membrana, remoción de grasas y aceites, tamizado grueso y fino y micro tamizado.
Primarios	Tamizado, sedimentación primaria
Secundarios	Lodos activados, reactores de lecho fijo, sistemas de lagunaje, sedimentación secundaria, deshidratación.
Terciarios	Coagulación química, floculación, sedimentación seguida de filtración y carbón activado. Intercambio iónico, osmosis inversa, electrocoagulación.

**Fuente:** (Metcalf & Eddy, 1996)

### 2.2.2 Coagulación Química

#### Coagulación

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. (Andía, 2000).

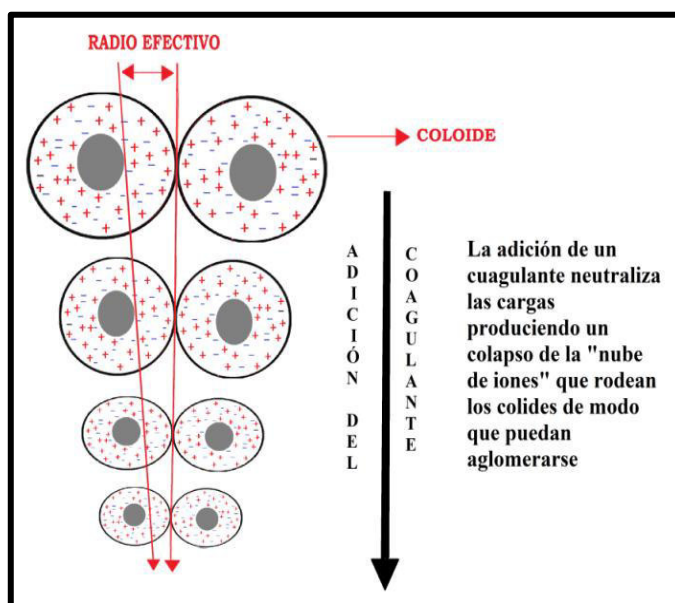
La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos:

- El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.

- El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua. (Barrenechea, 2004).

Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos, de acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etc.

Luego de la coagulación, viene la etapa de floculación y decantación, con la cual se logra remover la mayoría de partículas coloidales presentes en el agua contaminada logrando su clarificación para diversos usos. En la figura 1 se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos.



**Figura 1.** Coagulación

**Fuente:** (Andía, 2000)

## **Factores que afectan la coagulación química.**

### **Influencia del pH**

El pH es la variable más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua.

Para sales de aluminio el rango de pH para la coagulación es de 6.5 a 8.0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5.5 a 8.5 unidades. (Barrenechea, 2004)

### **Influencia de las sales disueltas**

Las sales contenidas dentro del agua ejercen las influencias siguientes sobre la coagulación y floculación:

- Modificación del rango de pH óptimo.
- Modificación del tiempo requerido para la floculación.
- Modificación de la cantidad de coagulantes requeridos.
- Modificación de la cantidad residual del coagulante dentro del efluente.

### **Influencia de la temperatura del agua**

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación. (Barrenechea, 2004)

### **Influencia de la dosis del coagulante**

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, es por eso que se requiere de una dosis óptima de coagulante, esta dosis nos permite obtener mejores resultados en la remoción de turbiedad y de contaminantes presentes en el agua. Muy poco coagulante y alta cantidad del mismo ocasionan problemas en la formación

de flóculos y disminuyen la eficiencia de la coagulación. (Barrenechea, 2004).

### **Influencia de mezcla**

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecho y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente. (Barrenechea, 2004).

### **Influencia de la turbiedad**

La turbiedad es un parámetro muy importante de la coagulación química ya que para cada turbiedad existe una dosis de coagulante en la cual se obtiene una turbiedad residual más baja. (Barrenechea, 2004).

### **2.2.3 Electrocoagulación**

Es un proceso electroquímico muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales, por medio del cual se desestabilizan las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, en los que el hierro y el aluminio son los más utilizados (Arango, 2005)

En el proceso de electrocoagulación hay generación de coagulantes in situ por la disolución de iones de aluminio o de hierro de los electrodos de aluminio o hierro respectivamente. La generación de iones metálicos tienen lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso las cuales ayudan a la flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente (Arango, 2005)

La electrocoagulación es utilizada en la remoción de contaminantes de muy diversas aguas residuales, tales como las de la industria de galvanoplastia, electro-plataado metálico, fábricas de envasados, industria del papel (desperdicios de molinos de papel), peleterías, molinos de acero, efluentes con contenido de cromo, plomo o mercurio y efluentes con contenido de aceites como los generados por talleres de maquinaria, refinerías, talleres de reparación de autos, transporte, almacenamiento y distribución de aceites, efluentes de la industria alimentaria, lavanderías e industria textil, y finalmente ha sido utilizada en la remoción de los contaminantes de las aguas para consumo humano y residuales domésticas (Arango,2009).

#### **2.2.4 Mecanismos del proceso de electrocoagulación.**

En la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos que permiten la remoción de los contaminantes. Estos procesos se pueden describir de la siguiente manera:

En los electrodos ocurren una serie de reacciones que proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo provee iones metálicos. A este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse. (Restrepo, 2006).

Los iones producidos cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua. Cuando estas cargas se han neutralizado los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparecen, permitiendo la formación de agregados de los contaminantes e iniciando así el proceso de coagulación. Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de contaminantes que se puede dar por dos vías: la primera por reacciones químicas y precipitación y la segunda procesos físicos de agregación de coloides, que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar.

Las reacciones más importantes que pueden sufrir las partículas de contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres. Estas reacciones cambian las propiedades del

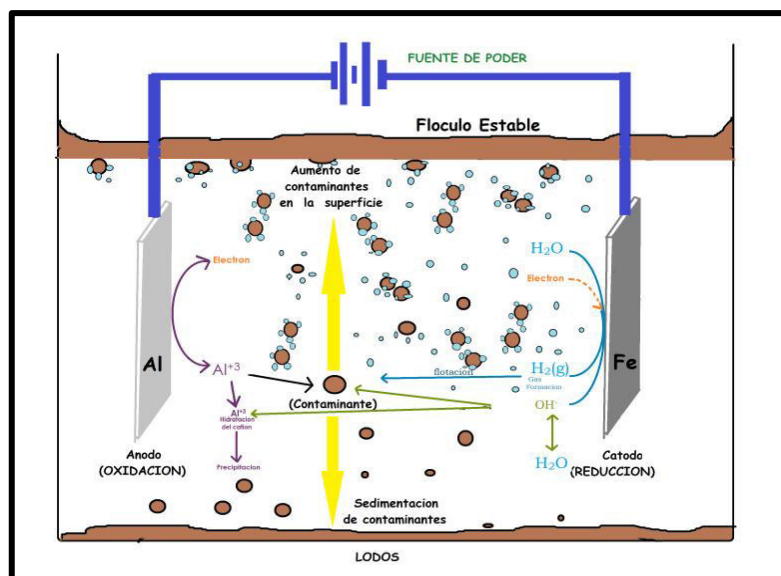
sistema agua- contaminantes, que conlleva a la eliminación de la carga contaminante del agua. (Restrepo, 2006).

De acuerdo con la ley de Faraday, que rige el proceso de electrocoagulación, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado por estequiometría con la cantidad de electricidad puesta en el sistema.

A diferencia de la coagulación química, proceso en el cual el coagulante es adicionado al sistema como agente químico, en la electrocoagulación el coagulante es formado in situ mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio. Como se explicó anteriormente, la producción de iones metálicos se da en el ánodo y son los iones que, por oxidación electrolítica, dan origen a la sustancia química que hace las veces de coagulante. (Restrepo, 2006).

Se considera que en el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y emulsiones y, finalmente, se produce la formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de éstas en el coagulante. (Restrepo, 2006).





**Figura 2.** Esquema de una celda de electrocoagulación

**Fuente:** (Mollah et al., 2004).

### 2.2.5 Reacciones presente en el proceso de electrocoagulación

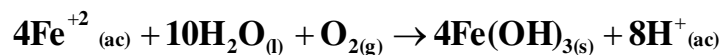
Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio. Por esta razón se tratarán de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de estos dos metales en la celda. La bibliografía referenciada trata ampliamente estas reacciones, no sólo para hierro y aluminio, si no también aquellas reacciones que ocurren cuando los electrodos son de otros metales o materiales.

El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes factores. Entre los más importantes se encuentran la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad. Estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante.

Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  o hidróxido férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . (Restrepo, 2006).

**Mecanismo 1:** Formación del hidróxido férrico

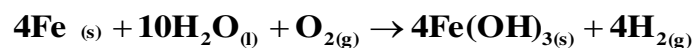
En el ánodo se presentan las siguientes reacciones de oxidación



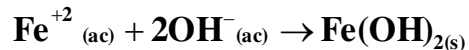
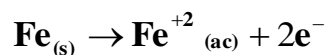
En el cátodo ocurre la reacción:



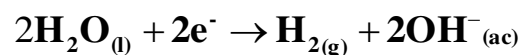
Reacción global:

**Mecanismo 2:** Formación del hidróxido ferroso

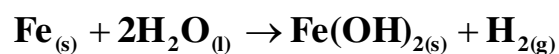
En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:



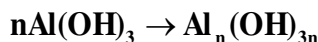
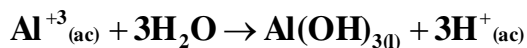
Reacción global:



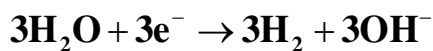
Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas. (Restrepo, 2006).

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes:

En el ánodo:



En el cátodo:



Los iones  $\text{Al}^{+3}$  en combinación con los  $\text{OH}^-$  reaccionan para formar alguna especie monomérica como  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ , y otras poliméricas, tales como  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$  y  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$  que por procesos de precipitación forman el  $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$ , como se muestra en la reacción de ánodo. El  $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$  es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes. (Restrepo, 2006).

### 2.2.6 Factores que afectan al proceso de electrocoagulación

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación y algunos de estos factores tienen mayor influencia sobre el proceso. A continuación discutiremos aquellos que se relacionan más directamente con la eficiencia del mismo.

#### pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación, y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. (Restrepo, 2006).

Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, e incluso este rango puede ser amplio. En términos generales las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7. Ejemplos de esta situación se pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo, donde el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da en pH entre 6 y 8, y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil se dan en un pH de 7. (Restrepo, 2006).

Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer. Especialmente en aguas residuales alcalinas, esta propiedad previene grandes cambios de pH con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH. (Restrepo, 2006).

### **Densidad de corriente**

Como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio. (Restrepo, 2006).

La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso. (Restrepo, 2006).

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio  $Al^{+3}$  o hierros  $Fe^{+2}$ , liberados por los respectivos electrodos.

En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficiencia. La selección de la

densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura. (Restrepo, 2006).

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción. (Restrepo, 2006).

### **Conductividad**

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. (Restrepo, 2006).

La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o  $\text{CaCl}_2$  genera un aumento en la conductividad del agua residual. Además se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl- alrededor del 20%. (Restrepo, 2006).

### **Temperatura**

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, punto donde se hace máxima para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo. (Restrepo, 2006).

## **Tiempo**

El tiempo de residencia, indican algunos autores determina que a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases, que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación. Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos. Sin embargo estos mismos autores señalan que sus variaciones resultan estadísticamente menos significativas que las variaciones de pH, ya que éste, está muy vinculado a la constante del producto de solubilidad ( $K_{ps}$ ) la cual debe disminuir al elevarse el mismo, lo que significa que los sólidos son más insolubles y por tanto se obtiene una mayor precipitación de los mismos en la medida que el pH aumenta. (Prieto, 2012)

### **2.2.7 Reactores para procesos de electrocoagulación**

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar. (Restrepo, 2006).

Una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación. Una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de coagulación existen dos formas de separarlo del medio acuoso, a saber: flotación y sedimentación. Así pues, los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación, o con coagulación y flotación. Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados (flóculos) del contaminante por flotación, mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante, reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación. (Restrepo, 2006).

Seguidamente describiremos a más detalle cada tipo de reactor:

## **Tipo Bach**

El reactor tipo bach, encontramos que éste debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas. (Restrepo, 2006).

El reactor utilizado para realizar la electrocoagulación en una operación por bach, en su forma más simple, está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectada a una fuente de energía externa (Arango, 2005). El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo.

El diseño formado por un par de electrodos no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una adecuada disolución del metal se requiere de electrodos de gran área superficial, es por esta razón que se utilizan celdas con electrodos monopolares en paralelo o conectados en serie.

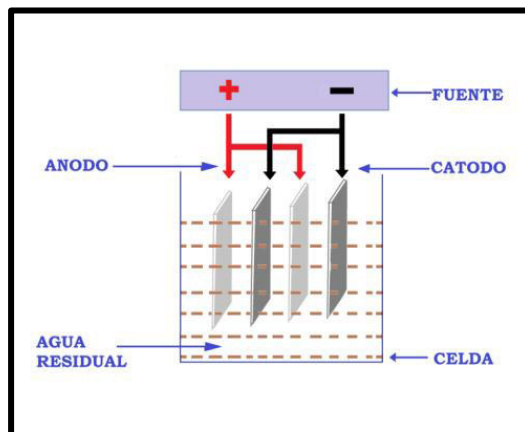
El sistema para la electrocoagulación requiere de una fuente de corriente directa, un regulador de densidad de corriente y de un multímetro para leer los valores de corriente. En la Figura 3 se muestran dos reactores para electrocoagulación con electrodos en paralelo. (Mollah, 2001).

### **Monopolar**

Los electrodos están conectados en paralelo y sometidos al mismo potencial, lo cual genera mayor gasto de energía.

### **En Paralelo**

En la disposición monopolar en paralelo la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos en relación a la resistencia de las células individuales. (Mollah, 2001). En la siguiente figura se aprecia la distribución de los electrodos.

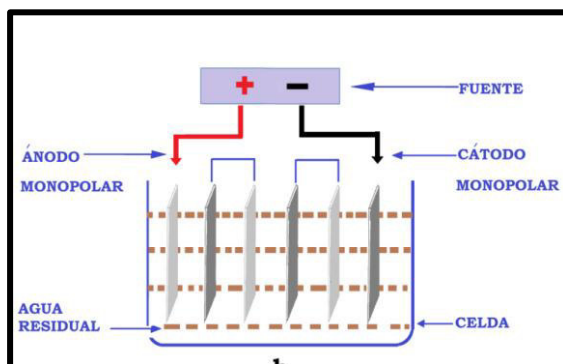


**Figura 3.** Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo.

**Fuente:** (Mollah, 2001).

### En Serie

La disposición electrodos monopolares en serie se observa que cada par de electrodos de sacrificio " está conectado internamente uno con el otro, y no tiene interconexiones con los electrodos externo. Esta disposición de electrodos monopolares con celdas en serie es eléctricamente similar a una única célula con muchos electrodos e interconexiones. En disposición en serie de electrodos, se requiere una diferencia de potencial más alto se requiere para una corriente dada porque las células conectadas en serie tienen una mayor resistencia. (Mollah, 2001).



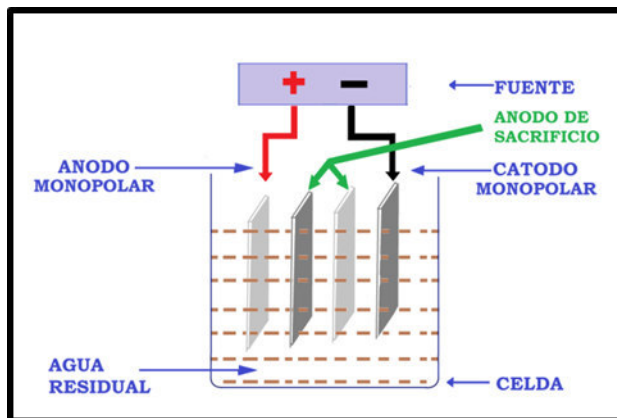
**Figura 4.** Reactor con electrodos monopolares conectados en serie

**Fuente:** (Mollah, 2001).

La configuración bipolar trabaja a menor intensidad y mayor voltaje que la monopolar. Las celdas bipolares tienen la ventaja de la sencillez de su disposición, ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño. Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos



alimentadores también origina que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando un bypass de corriente a los electrodos bipolares y produciendo por tanto pérdidas de corriente, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de electrodos. (Mollah, 2001).

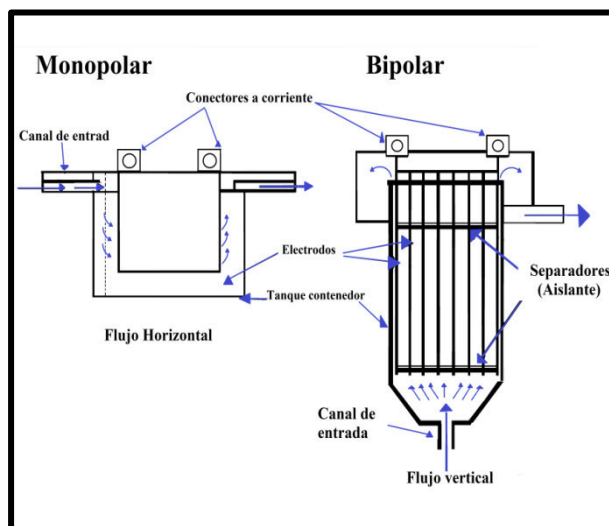


**Figura 5.** Reactor con electrodos bipolares conectados en paralelo.

**Fuente:** (Mollah, 2001).

### Reactores por el tipo de flujo

Los reactores se pueden clasificar en unidades de flujo horizontal y vertical. Esta disposición puede tener importancia cuando se pretende aprovechar el movimiento provocado por el oxígeno y el hidrógeno generados en los procesos anódicos y catódicos de oxidación y reducción del agua, respectivamente. Además, en función del modo de circulación del agua a tratar entre los electrodos, se pueden encontrar celdas de canales múltiples o bien de un sólo canal, tal y como se observa en la siguiente figura 6. La ventaja de las celdas de canales múltiples se encuentra en la sencillez de su disposición. Sin embargo debido al pequeño caudal de electrolito en cada uno de los canales, esta disposición puede favorecer el fenómeno de pasivación de los electrodos. (Chen, 2004)

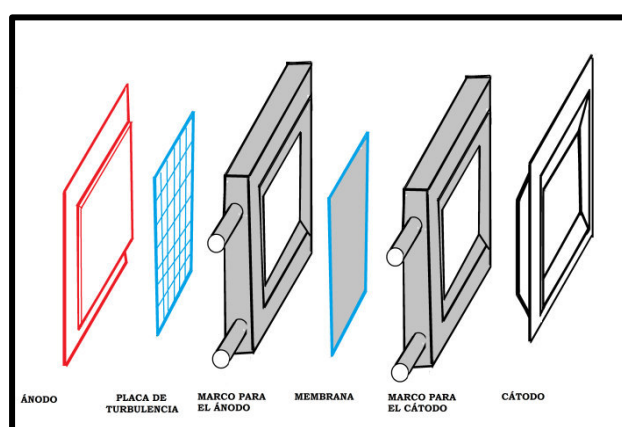


**Figura 6.** Reactores por el tipo de flujo.

**Fuente:** (Chen, 2004).

### Reactor filtro prensa

Uno de ellos es el tipo filtro prensa, constituido por un par de marcos. Uno de ellos soporta el ánodo y el otro el cátodo en forma de placas, de manera que su acople forma una cámara como se muestra en la figura 7. El agua a ser tratada entra por la parte lateral a la cámara y es inducida a flujo turbulento, para incrementar la eficiencia del proceso. Este sistema hace que su operación y mantenimiento sean relativamente simples. (Restrepo, 2006), (Chen, 2004).

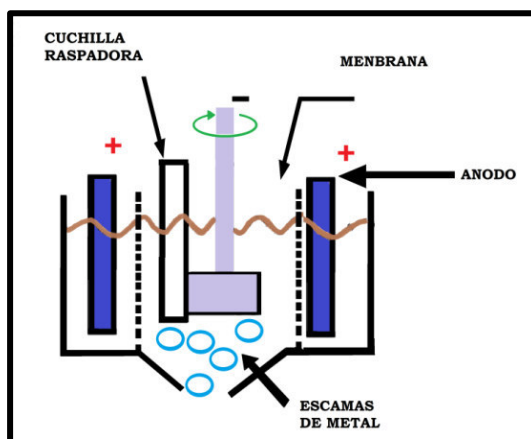


**Figura 7.** Reactores filtro prensa

**Fuente:** (Chen, 2004).

### Reactor de electrodo cilíndrico rotativo

Para la remoción de metales se usa el reactor de electrodo cilíndrico rotativo en el cual el cátodo gira en el centro de la celda y el ánodo se encuentra fijo como se muestra en la siguiente figura. Esta disposición permite aumentar la transferencia de masa en los electrodos y remover partículas de metal del cátodo. (Chen, 2004).



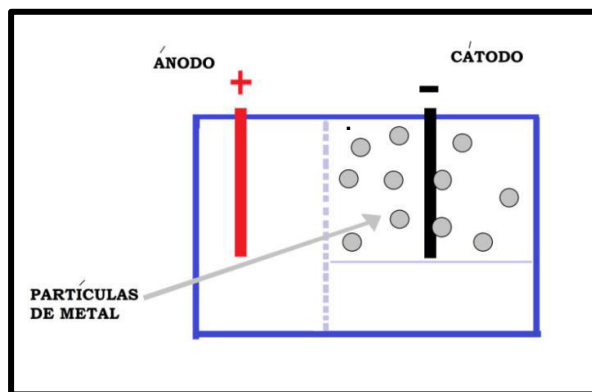
**Figura 8.** Reactor de electrodo cilíndrico rotativo

**Fuente:** (Chen, 2004).

### Reactor de lecho fluidizado

Finalmente, también es usado para la remoción de metales, un reactor de lecho fluidizado mostrado en la figura 9. Este permite aumentar el área específica superficial mejorando la eficiencia del proceso.

Los materiales usados en el ánodo deben ser dimensionalmente estables, por ejemplo como el acero que se utiliza en los reactores para la recuperación de metales. Los electrodos más modernos son fabricados de titanio con una pequeña capa de óxidos de metales nobles. Sin embargo, el material más comúnmente utilizado es el aluminio. El cátodo puede ser de metal, grafito, fibras de carbón, acero o titanio. (Chen, 2004).



**Figura 9.** Reactor de lecho fluidizado.

**Fuente:** (Chen, 2004).

### 2.2.8 Ventajas de la electrocoagulación

Son muchas las ventajas y desventajas de la electrocoagulación entre las más importantes tenemos:

#### **Ventajas:**

Son muchas las ventajas de la electrocoagulación. Entre las más relevantes están:

- Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.
- Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que representa un problema de disposición final de lodos.
- Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.
- Alta efectividad de remoción en un amplio rango de contaminantes.
- Purifica el agua y permite su reciclaje.
- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.

- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados.
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.
- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad.

### **Desventajas**

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.
- No es efectivo en la remoción de DBO soluble, proveniente de solventes y anticongelantes.
- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso. (Restrepo, 2006).

### **2.2.9 Aplicaciones de la electrocoagulación.**

Se ha aplicado la electrocoagulación para la remoción de diversas aguas residuales. En muchos casos se hace una combinación de esta técnica con flotación promovida también por electrólisis (electroflotación), cuya finalidad es aumentar la eficiencia de remoción del contaminante. Esto se realiza en un proceso en la misma celda, o en celdas consecutivas. Una de las aplicaciones más conocidas ha sido el tratamiento de aguas residuales de la industria de galvanoplastia y electro plateado metálico, proceso que busca remover la carga de metales solubles en las descargas de una industria por demás contaminante. (Restrepo, 2006).

La industria metalúrgica, la de producción de cromo, las curtiembres y la industria de fertilizantes, utilizan en sus procesos cromo, elemento de una

alta toxicidad. Las descargas de cromo son muy reguladas a nivel mundial y para su remoción se utilizan métodos convencionales que incluyen adsorción, precipitación química y degradación biológica, entre otros. La electrocoagulación combinada con electroflotación ha sido probada como alternativa para la remoción del cromo. Este tratamiento ha permitido obtener aguas tratadas con concentraciones de cromo por debajo de 0.5 ppm. (Restrepo, 2006).

La industria mecánica, las refinerías, los talleres de reparación automotriz, el transporte y la distribución y almacenamiento de aceites, producen aguas residuales con altos contenidos de elementos propiamente aceitosos y grasosos, que se caracterizan por presentar una gran estabilidad química de sus emulsiones aceite-agua. Esto representa una problemática ambiental importante. La electrocoagulación ha mostrado alta efectividad en desestabilizar dichas emulsiones y la consecuente remoción de los aceites y grasas. (Restrepo, 2006).

La electrocoagulación también ha sido utilizada en el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria, estas aguas se caracterizan por altos contenidos de DBO y DQO (demanda química de oxígeno), además de altos porcentajes de grasas. Una investigación realizada con las aguas residuales de los restaurantes de la ciudad de Hong Kong, las cuales fueron tratadas por electrocoagulación y electroflotación, mostró remociones de 99 y 88 % en grasas y DQO respectivamente. (Restrepo, 2006).

Una de las áreas de aplicación en las cuales se han desarrollado algunos avances importantes de esta tecnología y que incluso ha tenido mayor implementación de la misma, es el tratamiento de las aguas residuales de lavanderías, tintorerías e industria textil, obteniendo eficiencias importantes en la remoción de materia orgánica, turbiedad y color. (Restrepo, 2006).

La electrocoagulación también ha sido probada en la potabilización de aguas. Es importante resaltar que el paso de la corriente eléctrica a través del agua a tratar tiene efecto desinfectante en cuanto que destruye, en porcentajes por encima del 99%, los microorganismos presentes en el agua, en esta misma aplicación se ha venido estudiando la electrocoagulación con

buenos resultados en el tratamiento de aguas para consumo humano contaminadas con arsénico, contaminación ésta que puede afectar la salud de la población mundial ya que puede ocurrir en cualquier región o país. (Restrepo, 2006).

Otras posibles aplicaciones de la electrocoagulación están dadas en la remoción de nitratos en aguas superficiales y subterráneas contaminadas por nitratos lixiviados, procedentes de los fertilizantes artificiales usados en los cultivos. Finalmente, la electrocoagulación también ha sido probada en el tratamiento de aguas cuyos contaminantes son materia orgánica, como DBO en aguas residuales domésticas y efluentes de la industria de los colorantes. (Restrepo, 2006).

#### **2.2.10 Lodo del proceso de electrocoagulación.**

El lodo residual extraído de los procesos de tratamiento de las aguas residuales, ya sean biológicos o fisicoquímicos, generalmente suele ser un líquido o líquido semisólido con gran contenido en agua en sólidos. La producción de lodo residual en los tratamientos de aguas residuales es muy alta, por lo cual se convierte en un problema muy complejo ya que son costosos y difíciles de tratar. Este lodo proveniente del tratamiento de aguas es un muy difícil de manejar por su alto contenido de agua, por lo cual requiere un tratamiento adicional para secarlo y estabilizarlo, con diversos tipos de tratamiento, luego de esto al reducir el volumen se procede a su disposición final, que generalmente es un vertedero de residuos peligrosos.

Los lodos pueden ser de dos tipos:

**Lodo residual domestico:** este lodo tiene mayor contenido de materia orgánica y por provenir de un tratamiento biológico contiene mayor cantidad de agua.

**Lodo residual industrial:** este lodo se obtiene al tratar los efluentes de todos los procesos industriales, generalmente proviene de un tratamiento físico químico, conteniendo una menor cantidad materia orgánica y un alto de porcentaje de agua en su composición. En el caso de esta investigación,

trabajaremos con este tipo de lodo ya que es un efluente de una industria de pintura.

Una de las ventajas de la electrocoagulación ofrece es que sus lodos residuales son muchos más secos y estabilizados que los lodos residuales obtenidos en otros procesos convencionales como el físico químico y lodos activados, esto es de gran beneficio para ahorrar costos en su tratamiento, para luego realizar su disposición final.

Otro aspecto muy importante es que el volumen de los lodos producidos en la electrocoagulación es mucho menor de lo que se obtiene por coagulación química que es el tratamiento convencional, debido a que los primeros están menos hidratados.

En las siguientes tablas apreciaremos las características más importantes de los lodos producidos por efluentes domésticos e industriales, esto nos sirven de referencia del lodo obtenido en diversos tipos de tratamiento.

**Tabla 3.** Características de los lodos

Unidad	% humedad del lodo		Densidad relativa	
	Intervalo	Típico	Sólidos	Lodo
Sedimentación primaria	88-96	95	1,4	1,02
Filtro percolador	91-95	93	1,5	1,025
Precipitación Química	-	93	1,7	1,03
Lodos activados	90-93	92	1,3	1,005
Tanques sépticos	-	93	1,7	1,03
Tanque imhoff	90-95	90	1,6	1,04
Aireación prolongada	88-92	90	1,3	1,015
Lodo primario digerido anaerobiamente	90-95	93	1,4	1,02
Laguna aireada	88-92	90	1,3	1,01
Lodo primario digerido aerobiamente	93-97	96	1,4	1,012

**Fuente:** (Romero Jairo, 2005)



### 2.3 Bases conceptuales

- **Agua residual:** Se consideran aguas residuales a los líquidos que han sido utilizados en las actividades diarias de una ciudad (domésticas, comerciales, industriales y de servicios), generalmente estas contaminadas por sustancias orgánicas e inorgánicas.
- **Demanda química de oxígeno:** La demanda química de oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua residual, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. Su valor es un indicador de contaminación en todo tipo de aguas.
- **Conductividad:** La conductividad es una variable que se controla en muchos sectores, desde la industria química a la agricultura. Esta variable depende de la cantidad de sales disueltas presentes en un líquido y es inversamente proporcional a la resistividad del mismo. un aumento en la conductividad eléctrica genera un incremento en la densidad de corriente cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación.
- **pH:** El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio  $[H_3O]^+$  presentes en determinadas disoluciones.
- **Densidad de corriente:** como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual.
- **Turbiedad:** La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión; mide la claridad del agua.

## 2.4 Marco Legal

### Norma ambiental vigente

En esta investigación es importante la norma ambiental vigente que reglamenta las descargas de efluentes, y dado el caso que el agua residual utilizada para realizar las pruebas de laboratorio fueron obtenidas de una industria de pinturas las cuales son descargadas al alcantarillado, el cual es actualmente es supervisado por SEDAPAL y el Ministerio de Vivienda y Construcción.

Ante la problemática generada por las descargas de efluentes industriales a las redes de alcantarillado se promulgo la norma **VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES (VMA) DE LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS EN EL SISTEMA DE ALCANTARILLADO SANITARIO D.S. N° 021-2009-VIVIENDA**, la cual está vigente desde el 5 de Setiembre del 2013.

Con esta norma SEDAPAL y las empresas prestadores de saneamiento fiscalizan los parámetros con que deben descargarse los efluentes, y de no cumplirse están inmersos a una sanción económica o cierre definitivo.

Los valores máximos admisibles, son parámetros que permiten al usuario no doméstico, conocer los límites de descargas de aguas no domésticas en la red de alcantarillado que se encuentran bajo la administración de SEDAPAL.

Dado el caso mencionaremos algunos artículos importantes, así como las tablas en donde se hace referencia a los principales parámetros, con los cuales compararemos nuestros resultados en nuestra investigación.

### **Art. 1° FINALIDAD, ÁMBITO Y OBLIGATORIEDAD DE LA NORMA**

La presente norma regula mediante Valores Máximos Admisibles (VMA) las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario a fin de evitar el deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos y asegurar su adecuado funcionamiento, garantizando la sostenibilidad de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales.

Los VMA, son aplicables en el ámbito nacional y son de obligatorio cumplimiento para todos los usuarios que efectúen descargas de aguas

residuales no domésticas en el alcantarillado sanitario; su cumplimiento es exigible por las entidades prestadoras de servicios de saneamiento (SEDAPAL).

### **Art. 3° DEFINICIÓN DE VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES (VMA)**

Entiéndase por Valores Máximos Admisibles (VMA), como aquel valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracterizan a un efluente no doméstico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario, que al ser excedido en sus parámetros aprobados (Anexo N°1, y Anexo N°2) causa daño inmediato o progresivo a las instalaciones, infraestructura sanitaria, tratamiento de aguas residuales y tiene influencias negativas en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

**Tabla 4.** Anexo N° 1 Valores Máximos Admisibles

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>EXPRESIÓN</b>	<b>VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO</b>
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L	DBO <sub>5</sub>	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales (S.S.T)	mg/L	S.S.T.	500
Aceites y Grasas (A y G)	mg/L	A y G	100

**Fuente:** D.S. N° 021-2009-MINISTERIO DE VIVIENDA Y CONSTRUCCION

**Tabla 5.** Anexo N° 2 Valores Máximos Admisibles <sup>(1)</sup>

PARÁMETRO	UNIDAD	EXPRESIÓN	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0.5
Boro	mg/L	B	4
Cadmio	mg/L	Cd	0.2
Cianuro	mg/L	CN	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/L	Cr <sup>+6</sup>	0.5
Cromo Total	mg/L	Cr	10
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0.02
Níquel	mg/L	Ni	4
Plomo	mg/L	Pb	0.5
Sulfatos	mg/L	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	500
Sulfuros	mg/L	S <sup>-2</sup>	5
Zinc	mg/L	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	NH <sup>+4</sup>	80
pH(2)		pH	6-9
Sólidos Sedimentables(2)	mL/L/h	S.S.	8.5
Temperatura(2)	°C	T	<35

(1) La aplicación de estos parámetros a cada actividad económica por procesos productivos, está precisada en el reglamento de la presente norma tomando como referencia el código CIIU. Aquellas actividades que no estén incluidas, en este código deberán cumplir con los parámetros indicados en el presente Anexo.

(2) Estos parámetros, serán tomados de muestras puntuales. El valor de los demás parámetros, serán determinados a partir del análisis de una muestra compuesta.

**Fuente:** D.S. N° 021-2009-MINISTERIO DE VIVIENDA Y CONSTRUCCION

## **CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **3.1. Diseño y construcción de la celda de electrocoagulación**

#### **3.1.1 Dimensionamiento de la celda**

El dimensionamiento de la celda es basado en un sistema que opera como como un reactor tipo Bach a escala laboratorio con capacidad de tratar 4.5 litros de agua residual. El material usado para la fabricación de la celda fue acrílico transparente, de forma de una paralelepípedo rectangular, en el cual están sumergidos los electrodos que son de aluminio y fierro de forma cuadrada.

Estos electrodos están conectados a una fuente de poder la cual suministra la corriente para el proceso de electrocoagulación, en una primera etapa se utilizó una fuente de poder de voltaje constante, mientras que en las pruebas definitivas se utilizó una fuente de poder de voltaje y amperaje variable, permitiendo modificar el suministro de corriente que se le proporciona a la celda.

#### **Celda de electrocoagulación**

La celda de electrocoagulación o cuba electrolítica fue diseñada para tratar 4.5 litros de efluente, el material seleccionado fue acrílico transparente de tal forma que nos permita apreciar con claridad todos los procesos físico químicos de agua que se presentan en el proceso de electrocoagulación.

Se tuvo el criterio desde el inicio de fabricarla totalmente desarmable, para eso se fabricaron soportes de acrílico para los electrodos de tal manera que se pudiera variar los espaciamientos entre las placas y realizar una mejor limpieza de la celda después de cada prueba.

La celda es de forma de un paralelepípedo rectangular con las siguientes dimensiones:

Ancho = 20 cm   Largo = 15 cm   y   Altura= 20 cm.

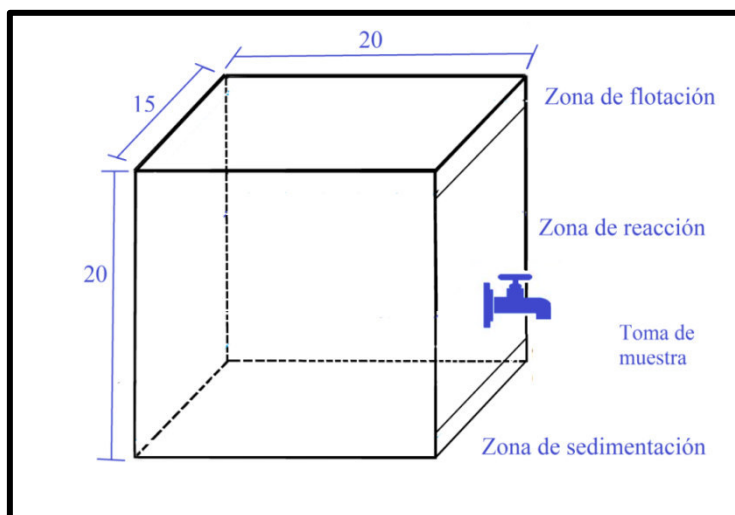
El agua residual se llenó hasta una altura de 15 cm dejando un espacio libre de 5 cm para la acumulación de lodos en la parte superior. La celda se diseñó con un criterio de generar 3 zonas principales las cuales se les denominó de la siguiente manera

**Zona de reacción:** donde están sumergidos los electrodos y se produce el proceso de electrocoagulación.

**Zona de Sedimentación:** donde precipitan los lodos sedimentables.

**Zona de Flotación:** donde se acumulan los lodos productos de la flotación.

Adicionalmente a esto se instaló un tomador de muestra, para esto se prefirió utilizar un caño de plástico el cual permita tomar más fácilmente las muestras a analizar, como se aprecia en la figura 10.



**Figura 10.** Dimensiones de la celda de electrocoagulación



**Figura 11.** Colocacion de electrodos de fierro y aluminio.

### **Electrodos**

Los materiales utilizados como electrodos fueron aluminio y fierro, esto se decidió consultando la bibliografía y basándose en estudios anteriores los cuales indican se obtienen muy buenos resultados, además que no son muy costosos y fáciles de conseguir. Las dimensiones de los electrodos fueron de 10 cm de largo y 10 cm de ancho, de forma cuadrada.

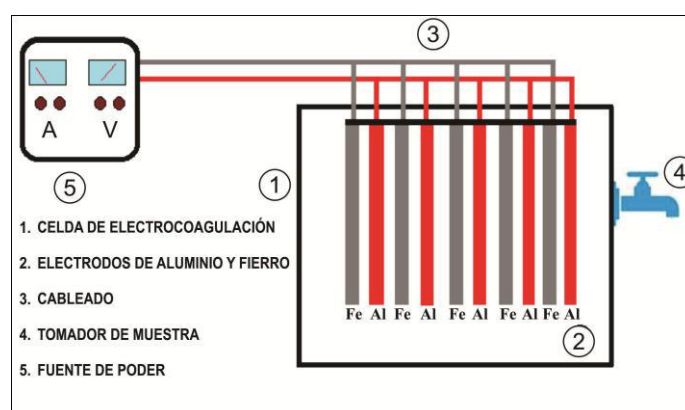
Para determinar el espaciamiento entre las placas de aluminio y fierro, se hicieron pruebas a diversos espaciamientos de 5mm, 10mm, y 20mm, obteniéndose mejores resultados en una distancia de 10 mm, la cual fue asumida para las pruebas definitivas. Se utilizaron un total de 10 placas metálicas como electrodos, 5 de aluminio y 5 de fierro, tomando al aluminio como ánodo (electrodo de sacrificio) y el fierro como cátodo.



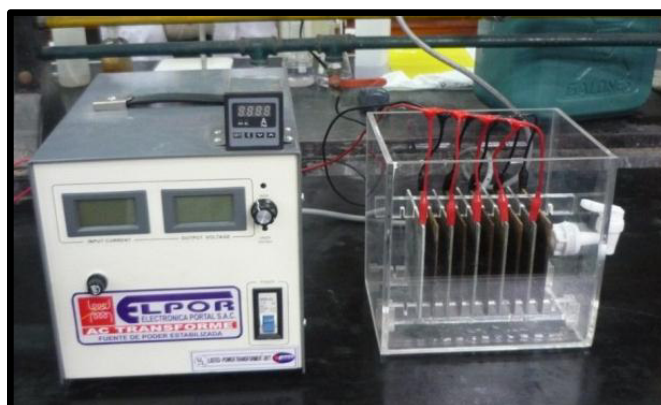
**Figura 12.** Cortado de electrodos de aluminio y fierro.

## Fuente de poder

La fuente de poder utilizada en las pruebas definitivas nos permitió regular la cantidad de corriente suministrada a la celda para el proceso de electrocoagulación, esta tenía una capacidad de suministrar hasta 12 amperios y un voltaje de 0 a 32 V, los cuales se podrían monitorear con medidores digitales de amperaje y voltaje. La verificación de las lecturas de los medidores digitales de intensidad de corriente se utilizó una pinza amperimétrica, un voltímetro y un cronometro para mediciones de tiempo. Para el suministro de corriente continua a los electrodos se utilizaron cables de uso eléctrico y cocodrilos para conectarlos a las placas de fierro y aluminio. En la figura 13 y 14 se observan un diagrama del sistema de electrocoagulación y el equipo utilizado en laboratorio.



**Figura 13.** Diagrama de equipo de electrocoagulación



**Figura 14.** Equipo de electrocoagulación.



### **3.1.2 Materiales y equipos utilizados en el laboratorio.**

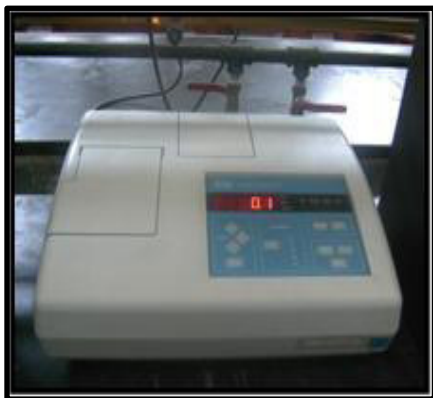
En las pruebas de laboratorio se utilizaron diversos equipos y materiales para las mediciones de las características físico químicas, así como el acondicionamiento del efluente en las diversas pruebas de laboratorio realizadas. Estos equipos y materiales se exponen a continuación:

#### **Reactivos.**

- Ácido sulfúrico al 98%
- Ácido sulfúrico al 20%
- Cloruro de sodio
- Agua desionizada
- Solución de cal 50g/L
- Aguas residuales provenientes del Industria de Pintura y pegamento.

#### **Equipos**

- Fuente de corriente DC (0 – 12A/ 0 - 30 V) Marca : ELPORT
- Pinza Amperimétrica
- Medidor Multiparametro pH, Conductividad y Temperatura
- Turbidímetro Marca HACH
- Colorímetro DR-980 Marca HACH
- Cronómetros
- Balanza Analítica de precisión



**Figura 15.** Turbidímetro HACH



**Figura 16.** Reactor DQO  
HACH



**Figura 17.** Colorímetro DR-980 HACH



**Figura 18.** Medidor  
Conductividad y pH

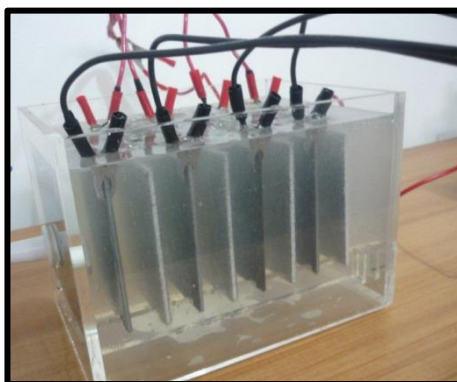
### 3.2 Ensayos de laboratorio preliminares

Basado en estudios anteriores, el proceso de electrocoagulación depende de variables como la densidad de corriente, pH, conductividad, tiempo de tratamiento, así como el material de los electrodos y espaciamiento entre las placas. Optimizar estas variables nos permite tener una mejor eficiencia en el tratamiento del agua residual, por lo cual se realizaron unas pruebas preliminares con agua de grifo y agua sintética preparada en laboratorio.

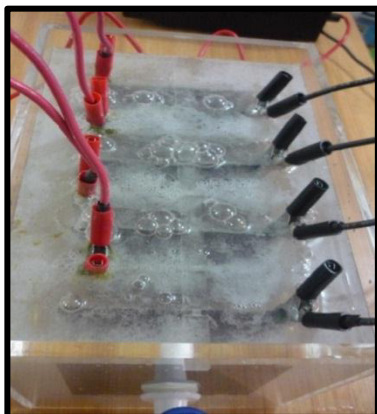
#### 3.2.1. Ensayos con agua de grifo

Una vez construida la celda de electrocoagulación se realizaron pruebas con agua de grifo de la red pública para observar el comportamiento hidráulico de la celda, permitiendo revisar si se presentan fugas de agua al momento de cargar al reactor, así como verificar el buen funcionamiento del tomador de muestras. Otro aspecto muy importante es la buena transferencia de corriente de la fuente de poder a los electrodos de aluminio y fierro, esto se ve reflejado en la formación de burbujas hidrogeno, así como la aparición los hidróxidos de aluminio en el ánodo.

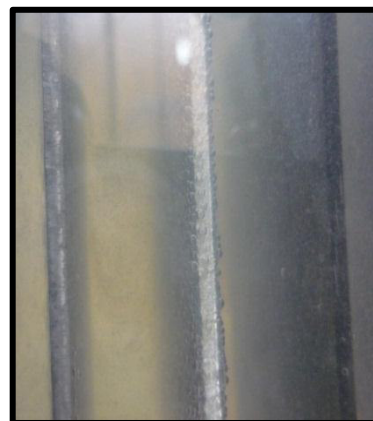
Se diseñó y construyó los soportes de los electrodos en acrílico de tal manera de poder variar el espaciamiento entre las placas, en estas pruebas preliminares se modificó el espaciamiento de tal manera de llegar a un valor el cual nos permita tener una mejor conductividad de la corriente.



**Figura 19.** Pruebas con agua de grifo



**Figura 20.** Pruebas de transferencia de corriente.



**Figura 21.** Burbujas de  $H_2$ .

### 3.2.2. Ensayos con agua residual sintética preparada en laboratorio

Luego de realizar prueba para verificar y optimizar las mejores condiciones de funcionamiento de la celda de electrocoagulación, se preparó agua sintética utilizando el procedimiento que se indica a continuación:

#### Preparación del agua sintética

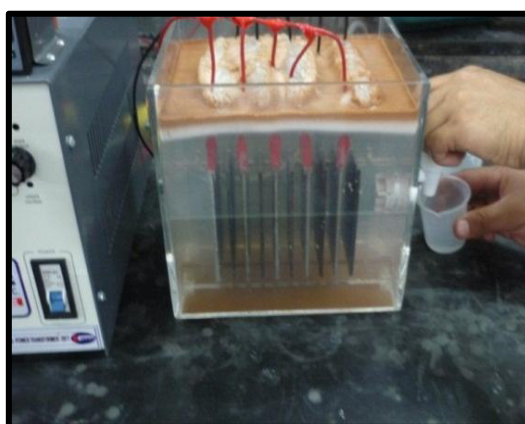
- Se utilizó agua de la red y arcilla roja mezclándola obteniendo una solución bien concentrada.
- Luego de esto se recolectó el sobrenadante después de un lapso de tiempo el cual nos permite que sedimenten las partículas más grandes y obtener una solución homogénea.
- En base a esta solución se preparó el agua para las pruebas mezclándola progresivamente con agua hasta obtener una suspensión de 660 UNT, la cual se mostró bastante estable.
- Adicionalmente a esto se hizo mediciones del pH y la conductividad obteniendo los valores de 7.8 y 560  $\mu S/cm$  respectivamente.



**Figura 22.** Agua sintética preparada en laboratorio 660 UNT



**Figura 23.** Llenado del equipo



**Figura 24.** Toma de muestra final

### 3.3 Caracterización físico-química y biológica del efluente.

El agua residual seleccionada para las pruebas de laboratorio definitivas fue un efluente proveniente de una Industria de Pinturas y Pegamentos, la cual fue monitoreada en la misma planta de tratamiento de la empresa.

El efluente presenta a simple vista un color blanco, con una alta DQO aproximadamente de **3920 mg/l**, evidenciando su alto grado de contaminación. También se puede apreciar una alta turbiedad y sólidos suspendidos totales.

Con respecto al pH y conductividad que son 2 variables que influyen en el proceso de electrocoagulación están en valores normales, el **pH es 7.12** que es casi neutro y está en el intervalo de valores que la bibliografía recomienda. La conductividad tiene un valor de **2930  $\mu\text{S/cm}$**  siendo un valor aceptable por lo cual no fue necesario agregarle cloruro de sodio (NaCl) para modificar su valor en las pruebas.

Según los datos recogidos en el lugar de monitoreo el efluente es básicamente de tipo industrial, proveniente de las descargas de los procesos industriales y de otras actividades comunes de la empresa. Luego del monitoreo en planta se envió la muestra del efluente crudo a un laboratorio para la realización de los análisis físicoquímicos y biológicos para establecer las condiciones iniciales del efluente, estos resultados se indican a continuación en la siguiente tabla:

**Tabla 6.** Análisis Físico Químicos y Biológicos del efluente

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	METODO
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	2 930.00	Colorímetro
Color	U.C.	16 300.00	Colorímetro
DQO	mg/L	3 920.00	Colorímetro
DBO <sub>5</sub>	mg/L	1250.00	Winkler
pH	.....	7.12	Colorímetro
Sólidos			
Suspendidos	mg/L	1 298.00	Gravimétrico
Totales			
Turbiedad	U.N.T.	1 919.00	Turbidímetro
Coliformes Fecales	NMP/100ML	$20 \times 10^3$	Tubos Múltiples

**Figura 25.** Imagen del efluente crudo

### 3.4 Ensayos de laboratorio definitivos

Luego de realizar el análisis físico químico y biológico del agua residual industrial monitoreada, se inició la etapa de pruebas con un efluente real con la perspectiva de hallar la eficiencia del tratamiento electroquímico planteado en los objetivos de la presente investigación. Para esto se hicieron varias corridas de tratamiento, en los cuales al inicio se mantuvo las condiciones iniciales del efluente y solo se varió la intensidad de corriente.

En una segunda etapa se varió el pH de su estado inicial a un medio básico y un medio ácido, esto nos servirá para evaluar una de las variables más importantes del proceso de electrocoagulación.

Por ser un efluente industrial y con la finalidad de cumplir el objetivo planteado en esta investigación, se evaluó el porcentaje de remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DQO, es decir se midió la DQO inicial y luego del tratamiento la DQO final, esta se tomó a los 5, 10 y 15 minutos de tratamiento.

#### 3.4.1 Ensayo A pH = 7.12

En este ensayo de laboratorio se planteó trabajar con las condiciones iniciales del efluente, variando solo la intensidad de corriente y midiendo la DQO a los 5, 10 y 15 minutos del proceso para obtener un porcentaje de remoción.

**Tabla 7.** Condiciones Iniciales del Efluente pH = 7.12

Intensidad de corriente	3A , 5A ,8A
pH	7
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	2930
DQO (mg/l)	3920
Turbiedad (UNT)	1919
Sólidos suspendidos totales (mg/l )	1298



### 3.4.2 Ensayo B pH = 4

En esta tercera etapa se disminuyó el pH hasta un medio ácido pH= 4, realizando pruebas sucesivas variando la intensidad de corriente eléctrica.

**Tabla 8.** Condiciones Iniciales del Efluente pH=4

Intensidad de corriente	3A , 5A ,8A
pH	4
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	2930
DQO (mg/l)	3920
Turbiedad (UNT)	1919
Sólidos suspendidos totales (mg/l )	1298

### 3.4.3 Ensayo C pH = 10

En estos ensayos se aumentó el pH utilizando soda cáustica hasta llegar a un valor de 10, esto para verificar el comportamiento del proceso en estas condiciones.

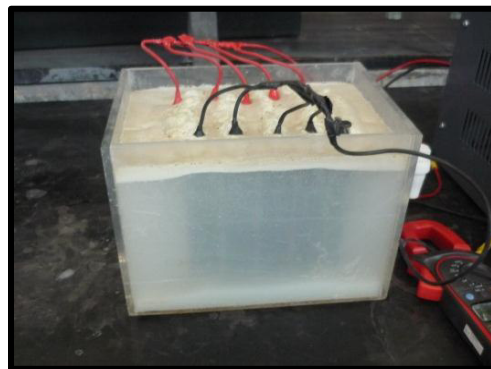
**Tabla 9.** Condiciones Iniciales del Efluente pH = 10

Intensidad de corriente	3A , 5A ,8A
pH	10
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	2930
DQO (mg/l)	3920
Turbiedad (UNT)	1919
Sólidos suspendidos totales (mg/l )	1298

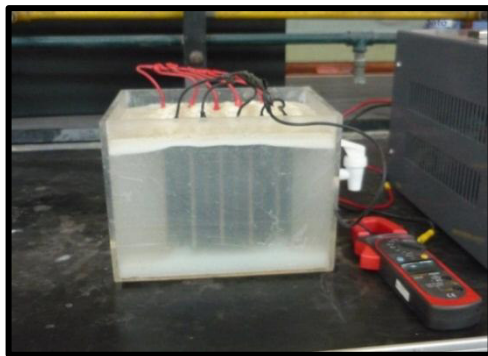
A continuación desde la figura 26 a la 31 podemos observar todo el proceso de tratamiento del efluente industrial crudo con el equipo de electrocoagulación, evidenciando el buen rendimiento en la remoción de contaminantes.



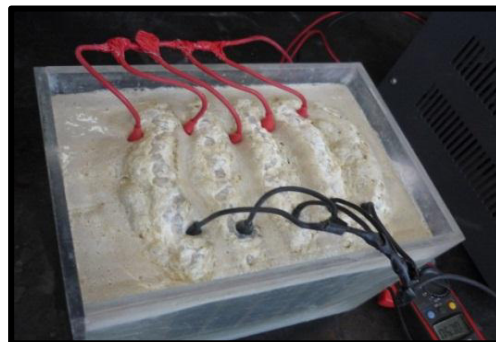
**Figura 26.** Inicio del tratamiento



**Figura 27.** A 5 min de tratamiento



**Figura 28.** A 10 min de tratamiento



**Figura 29.** Formación de lodos



**Figura 30.** A 15 min de tratamiento



**Figura 31.** Efluente inicial y final

### 3.5 Ensayos adicionales

#### 3.5.1 Lodo del proceso electrocoagulación

La bibliografía y estudios anteriores indican que el lodo del proceso de electrocoagulación es más seco y compacto, más fácil de manejar y su disposición final es más económico debido a un menor volumen.

Se realizaron pruebas con el agua residual industrial utilizada en esta investigación, sometiéndola a las condiciones óptimas de tratamiento con un amperaje de 5A y un tiempo de 15 min de tratamiento.

Luego de esto se caracterizó el lodo residual, para pasar a determinar sus características principales y realizar una comparación con el lodo físico químico.



**Figura 32.** Inicio de tratamiento



**Figura 33.** Formación de lodo.



**Figura 34.** Lodo final del tratamiento

### **3.5.2 Lodo del proceso físico químico convencional**

Una de las principales desventajas del tratamiento físico químico es la mayor cantidad de lodos que se produce al utilizar un coagulante como el cloruro férrico el sulfato de aluminio, tanto en términos volumétricos como en términos másicos. Estos contienen altos porcentajes de agua por cual hay que tratarlos para extraerles el agua y estabilizarlos por lo cual requieren un tratamiento adicional.

Los procesos físico-químicos son utilizados generalmente en el tratamiento de soluciones coloidales, las cuales se presentan con frecuencia en muchas industrias como son: metal-mecánica, pinturas textil, lavandería, alimenticia, automotriz, petrolera, química, petroquímica, minera, galvanoplastia, agropecuaria y otras más.

Por este motivo en este proyecto se realizó un tratamiento físico químico convencional con prueba de jarras para darnos una idea de las condiciones de este y hacer una comparación con el lodo producido en la electrocoagulación

#### **Prueba de jarras**

La prueba de jarras representa un tratamiento físico químico convencional a escala laboratorio, en las cuales se agrega un coagulante químico como el cloruro férrico y el cual a diversas gradientes de velocidad, formando flocs y precipitando y de esta manera clarificar el efluente. Por lo cual se realizó la prueba con el mismo efluente industrial utilizado en el proceso de electrocoagulación, para obtener una comparación válida.



**Figura 35.** Equipo de prueba de jarras



**Figura 36.** A 15 minutos de tratamiento.



**Figura 37.** Finalización de la prueba



**Figura 38.** Lodo tratamiento físico químico.

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 Resultados de agua residual sintética

Luego de preparar el agua sintética hasta alcanzar una turbiedad de 660 UNT, se realizaron pruebas con la celda de electrocoagulación como una fase preliminar antes de realizar las pruebas definitivas.

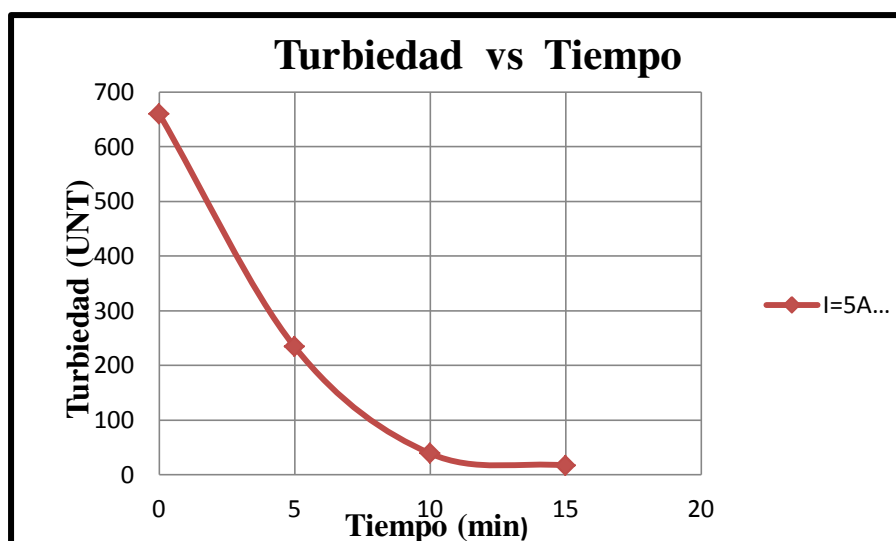
En esta etapa se evaluó la remoción de turbiedad, obteniéndose buenos resultados llegándose a reducirla hasta 17 UNT en un tiempo de 15 minutos. La eficiencia promedio obtenida con el proceso de electrocoagulación fue del 97% en la remoción de turbiedad.

**Tabla 10.** Condiciones iniciales del agua sintética

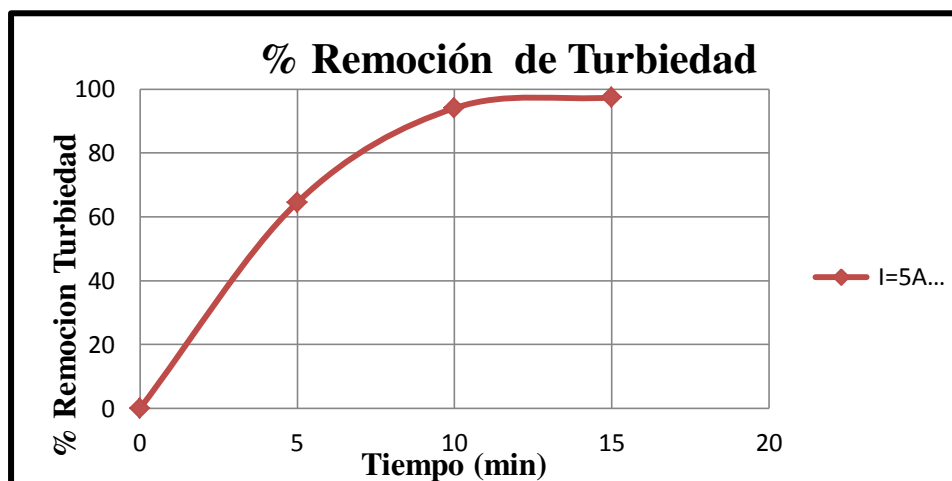
Condiciones iniciales del agua sintética	
Turbiedad inicial (UNT)	660
pH	7.6
Alcalinidad (mg/l)	180

**Tabla 11.** Remoción de la turbiedad en función del tiempo. (Agua sintética)

Tiempo (min)	5	10	15
Turbiedad(UNT)	234	39	17



**Figura 39.** Variación de la turbiedad respecto al tiempo. (Agua sintética)



**Figura 40.** Porcentaje remoción de turbiedad respecto al tiempo. (Agua sintética)

## 4.2 Resultados de los ensayos definitivos

El parámetro evaluado para determinar la eficiencia fue la DQO, esto para obtener un porcentaje de remoción de contaminantes en el efluente después del tratamiento. Otro parámetro importante fue la turbiedad que fue medido al inicio y al final del tratamiento.

### 4.2.1 Resultados Ensayo A pH=7.12

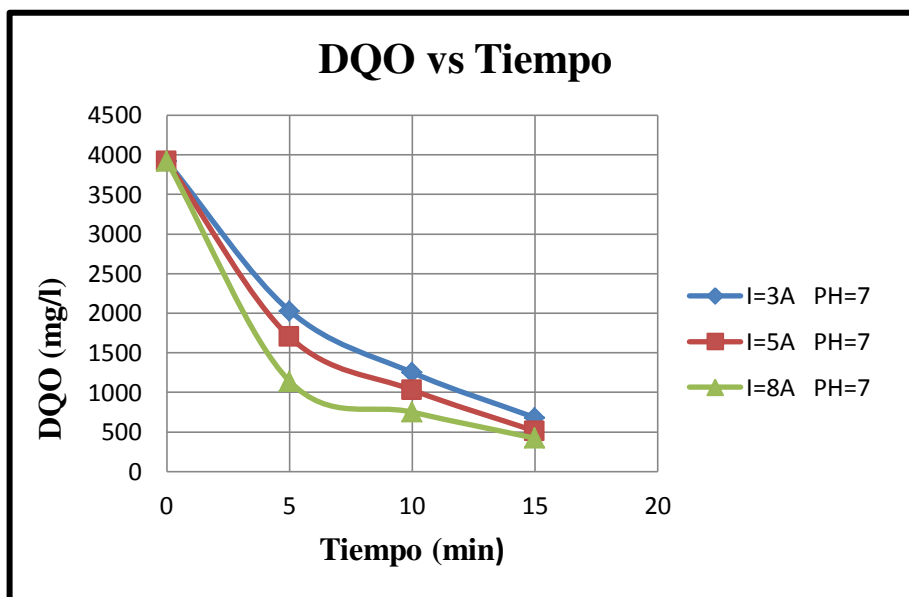
En esta primera etapa de pruebas se mantuvo las condiciones iniciales de del efluente con sus propias características, como el pH y la conductividad.

De los resultados obtenidos como se aprecia en el tabla 12 y figura 41 se puede concluir que la mejor eficiencia en la remoción de DQO con el proceso de electrocoagulación, bajo condiciones de pH= 7.1, I= 8 A, se obtiene una eficiencia del **89%**. Se puede apreciar que la DQO disminuye **de 3920 a 420 mg/l**, lo cual es un buen indicativo en la disminución de los contaminantes en el efluente.

**Tabla 12.** Resultados de la DQO en función a la intensidad de corriente y el tiempo pH=7.12

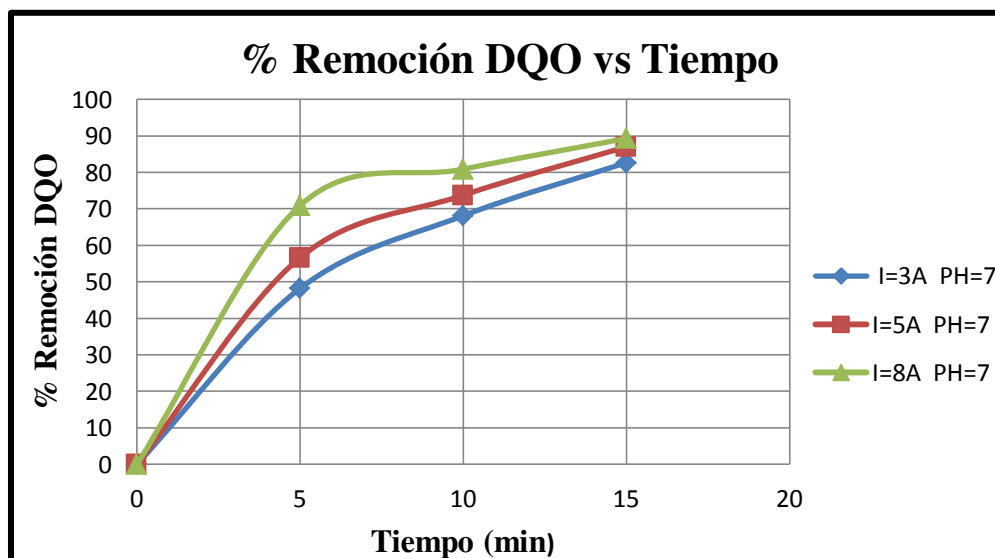
Condiciones iniciales del efluente			
pH = 7,12	Conductividad =2930 $\mu$ S/cm		DQO = 3920 mg/L
Tiempo (min )	DQO Final (mg/l)		
	Intensidad de corriente (amperios)		
	I = 3 A	I = 5 A	I = 8 A
5	2030	1700	1140
10	1250	1030	750
15	680	510	420





**Figura 41.** Variación de la DQO en función del tiempo, la intensidad de corriente y pH =7.12

De los datos obtenidos en la tabla anterior hallamos la eficiencia para cada intensidad de corriente la cual se resume en la figura 42:



**Figura 42.** Porcentaje de remoción de DQO en función del tiempo, intensidad de Corriente y pH=7.12

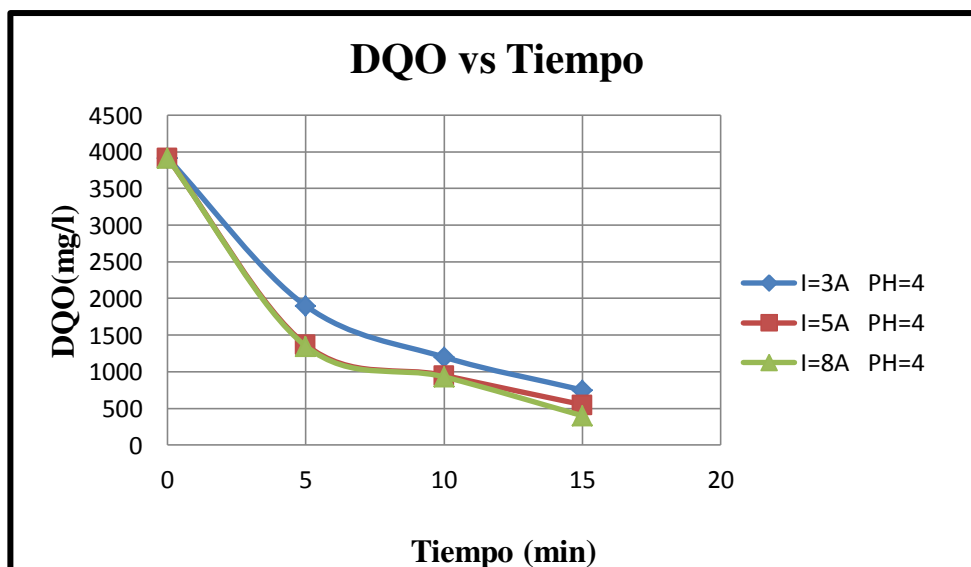
#### 4.2.2 Resultados Ensayo B pH = 4

En estos ensayos para tener una mejor evaluación del efecto del pH en la eficiencia del tratamiento con electrocoagulación se decidió disminuirlo hasta llegar a un medio ácido de **pH=4**, esto se consiguió agregando ácido sulfúrico, la conductividad y concentración del efluente se mantuvieron constantes.

Los resultados obtenidos bajo estas condiciones se pueden apreciar en la tabla 13 y figura 43, que la mejor eficiencia en la remoción de DQO fue del 90% aproximadamente, a partir de una intensidad de corriente de  $I = 8 \text{ A}$  en un tiempo de 15 minutos.

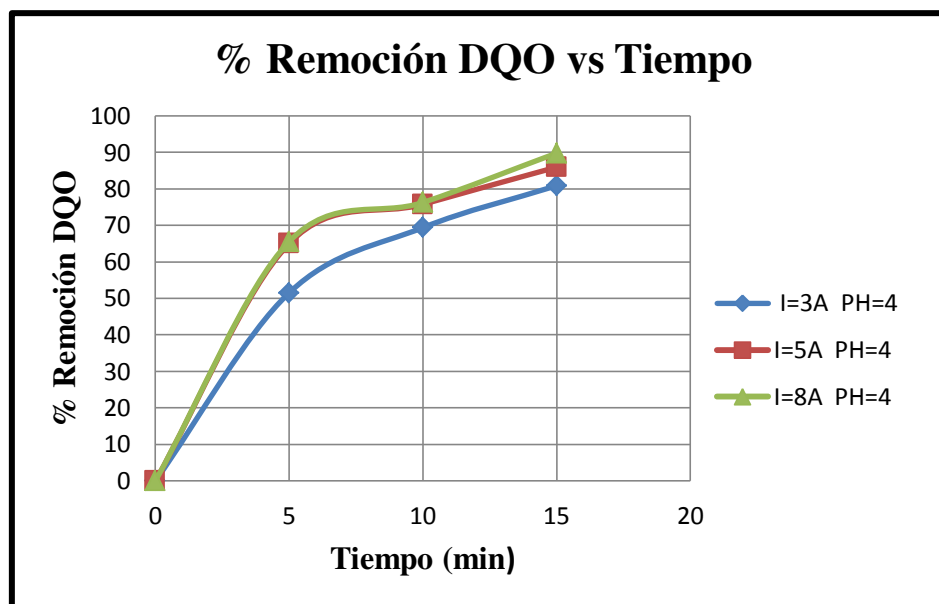
**Tabla 13.** Resultados de la DQO en función a la intensidad de corriente y el tiempo pH=4

Condiciones iniciales del efluente			
pH = 4	Conductividad =2930 μS/cm		DQO = 3920 mg/L
Tiempo (min )	DQO Final (mg/l)		
	Intensidad de corriente (amperios)		
	I = 3 A	I = 5 A	I = 8 A
5	1900	1370	1350
10	1200	950	930
15	750	550	400



**Figura 43.** Variación de la DQO en función del tiempo, intensidad de corriente y pH =4

De los datos obtenidos en la tabla 13, hallamos la eficiencia para cada intensidad de corriente la cual se resume en la figura 44:



**Figura 44.** Porcentaje de remoción de DQO en función del tiempo, intensidad de corriente y pH=4

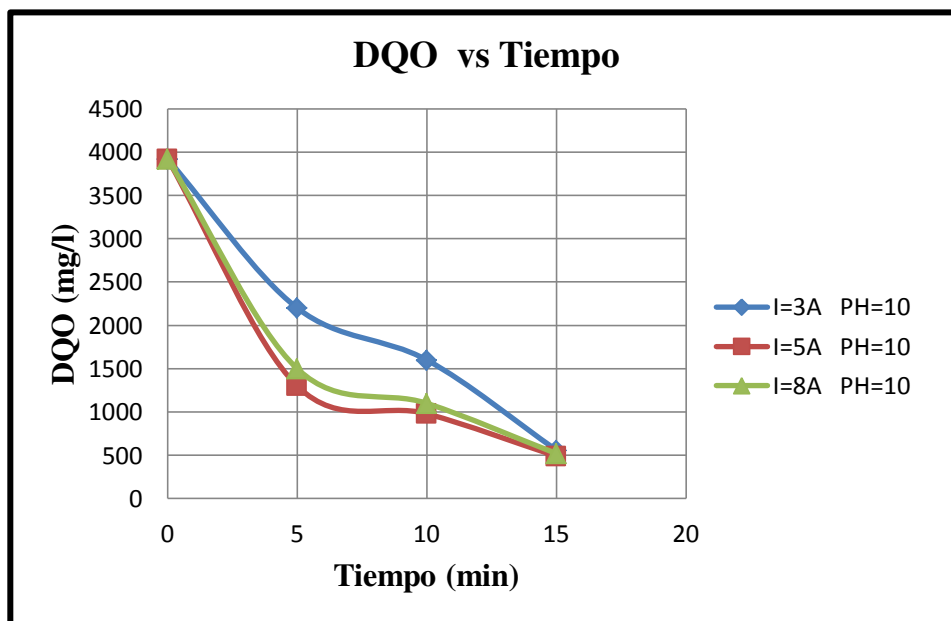
### 4.2.3 Resultados Ensayo C pH=10

En este ensayo decidimos pasar a un medio básico llegando a obtener un pH= 10, manteniendo la conductividad y concentración del efluente constante. La variación se realizó usando Hidróxido de Sodio.

Los resultados obtenidos bajo estas condiciones se pueden apreciar en el tabla 14 y la figura 45 que la mejor eficiencia en la remoción de DQO fue del 88 % ,esto aplicando una intensidad de corriente  $I=5$  A en un tiempo de 15 minutos.

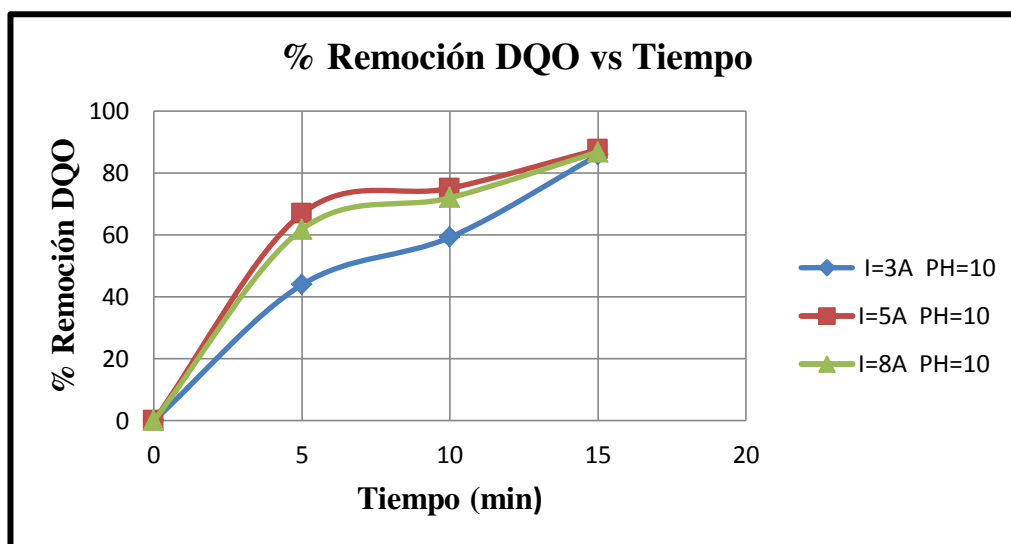
**Tabla 14.** Resultados de la DQO en función a la intensidad de corriente y el tiempo pH=10

Condiciones iniciales del efluente			
pH = 10	Conductividad =2930 μS/cm		DQO = 3920 mg/L
Tiempo (min )	DQO Final (mg/l)		
	Intensidad de corriente (amperios)		
	I = 3 A	I = 5 A	I = 8 A
5	2200	1300	1500
10	1600	980	1100
15	560	490	520



**Figura 45.** Variación de la DQO en función del tiempo, la intensidad de corriente y pH =10

De los datos obtenidos en la tabla 14, hallamos la eficiencia para cada intensidad de corriente la cual se resume en la figura 46:



**Figura 46.** Porcentaje de remoción de DQO en función del tiempo, intensidad de corriente y pH=10

### 4.3 Aluminio residual en el efluente tratado

Es ya conocido que durante el proceso de electrocoagulación se da la producción de especies por la disolución del ánodo, y en el caso de esta investigación se utilizó el aluminio como electrodo de sacrificio, estos producen especies como el  $\text{Al}_3^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2$ , etc., por lo tanto realizamos mediciones de la concentración de aluminio antes y después del tratamiento para verificar como aumenta la concentración del aluminio y el fierro en el efluente después del tratamiento. Se realizó un barrido de metales en ICP, para determinar las respectivas concentraciones.

La tabla 15 describe el aumento considerable de concentración del aluminio en el efluente, esto por la disolución del ánodo y una disminución en el valor de fierro residual.

Esto se explica mejor en la siguiente tabla:

**Tabla 15. Resultados de la concentración de aluminio y fierro en el efluente.**

Material	Concentración inicial (mg/l)	Concentración final (mg/l)
Aluminio	0.39	7.00
Fierro	1.019	0.412

### 4.4 Variación del pH, conductividad y temperatura

#### 4.4.1 Variación del pH.

Los valores óptimos de pH según estudios anteriores para este tipo de tratamiento es con valores cercanos a 7. Según Arango, se sabe que este influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar un hidróxido.

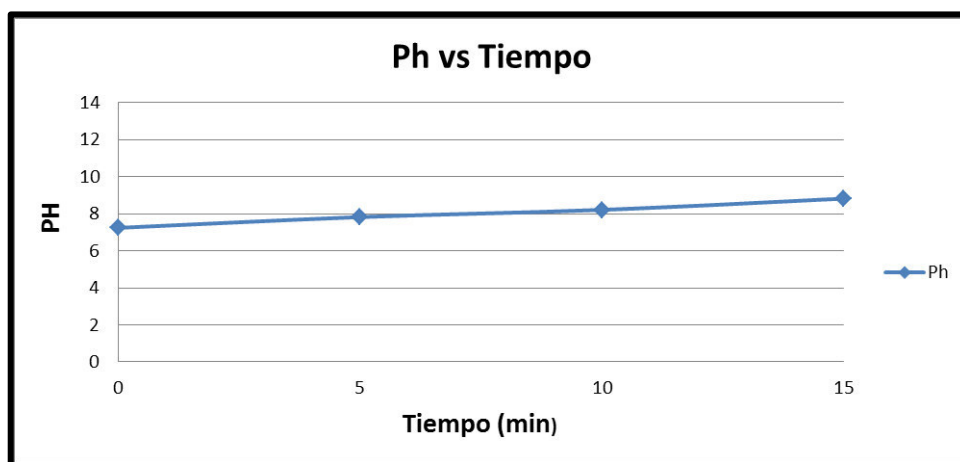
**Tabla 16.** Condiciones de operación para las mediciones del pH.

Condiciones	Valores
Intensidad de Corriente	5 A
pH	7.12

**Tabla 17.** Valores del pH respecto al tiempo.

Tiempo (min)	PH
0	7.24
5	7.82
10	8.21
15	8.82

La figura 47 muestra la evolución del pH respecto al tiempo dentro del reactor de electrocoagulación, estas mediciones se hicieron con las mejores condiciones de operación. (Tabla 16).

**Figura 47.** Variación del pH vs Tiempo

#### 4.4.2 Variación de la conductividad.

La conductividad es uno de los parámetros que influye en la eficiencia de la electrocoagulación, un incremento de esta genera un aumento en la densidad de corriente. En este estudio en particular la conductividad inicial del efluente presentó un valor de 2930 uS/cm (Tabla 19), el cual es aceptable y en las pruebas preliminares se observó una buena conducción de la corriente. Según la bibliografía en algunos casos es necesario agregar cloruro de sodio para mejorar la conductividad del efluente, en el caso de nuestro proyecto no fue necesario por lo indicado anteriormente.

**Tabla 18.** Condiciones de operación en mediciones de la conductividad

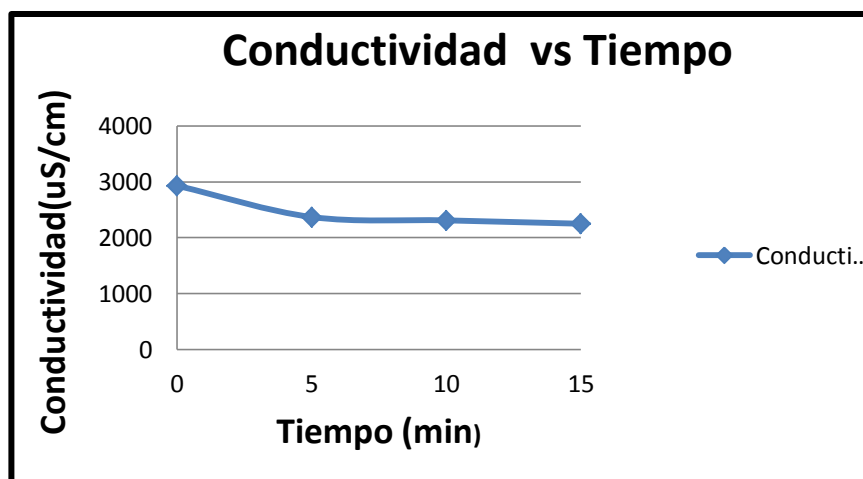
Condiciones	Valores
Intensidad de Corriente	5 A
pH	7.12

**Tabla 19.** Valores de la conductividad respecto al tiempo.

Tiempo	Conductividad (uS/cm)
0	2930
5	2372
10	2312
15	2250

A continuación se presentan figura de la evolución de la conductividad respecto al tiempo dentro del reactor de electrocoagulación. Las mediciones se hicieron con las mejores condiciones de operación (Tabla18)





**Figura 48.** Variación de la conductividad vs tiempo

#### 4.4.3 Variación de la temperatura

Un incremento de temperatura aumenta la velocidad de la reacción, independientemente de que ésta sea exotérmica o endotérmica. La velocidad de la reacción se duplica por cada 10°C de aumento de temperatura. Esto hace de suponer que podría ser beneficioso para el proceso, sin embargo un incremento de temperatura en el proceso de electrocoagulación lleva a la dispersión de los agregados formados durante el proceso.

Por todo esto se realizó pruebas para determinar la variación de la temperatura en la solución con respecto al tiempo (Tabla 21) de la solución sometido a electrocoagulación observándose que aumento de un 1°C por cada 5 minutos de tratamiento, con esto se evidencia el paso de la corriente en la solución tratada.

Estas mediciones se realizaron con las mejores condiciones de operación (tabla 20) de la celda, como se indica en el siguiente cuadro.

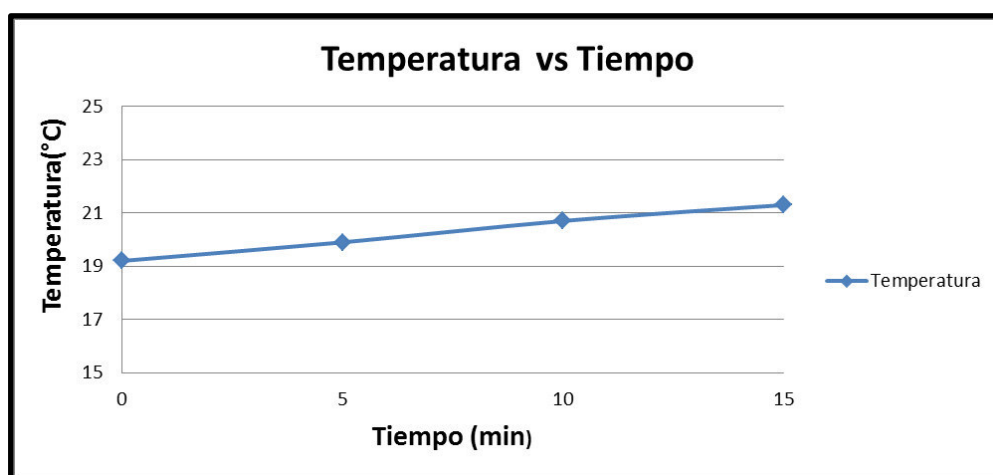
**Tabla 20.** Condiciones de operación en mediciones de la temperatura.

Condiciones	Valores
Intensidad de Corriente	5 A
pH	7.12

**Tabla 21.** Valores de temperatura con respecto al tiempo.

Tiempo	Temperatura (°C)
0	19.2
5	19.9
10	20.7
15	21.3

La figura 49 muestra la evolución de la temperatura respecto al tiempo dentro del reactor de electrocoagulación, estas pruebas fueron realizadas con electrodos de aluminio y hierro.

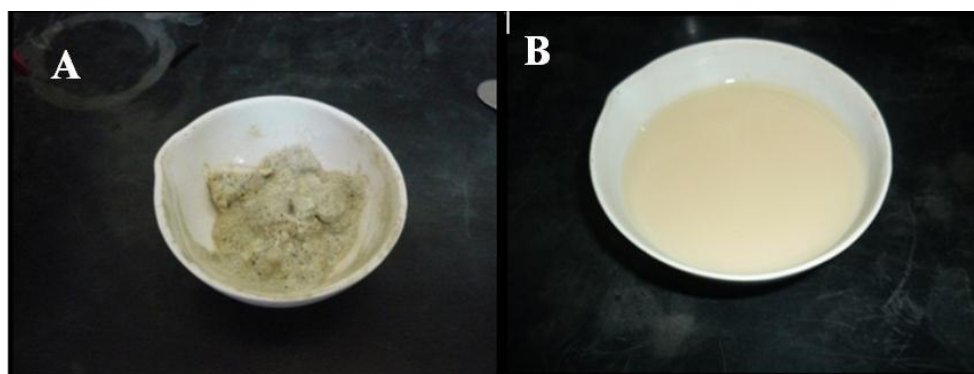
**Figura 49.** Variación de la temperatura vs tiempo.

## 4.5 Lodo del proceso de electrocoagulación

### 4.5.1 Comparación de lodos de electrocoagulación y físico químico

La electrocoagulación genera poca cantidad de lodo. Los lodos formados por electrocoagulación son similares a los obtenidos mediante procesos químicos. No obstante, los lodos obtenidos mediante electrocoagulación retienen menos agua y son más estables, por lo tanto, se pueden separar más rápidamente mediante filtración.

A continuación se muestra imágenes de los lodos obtenidos en los dos procesos comprobándose que el lodo físico químico contiene mucha más cantidad de agua, en cambio el lodo por electrocoagulación presenta mejores características para su posterior tratamiento y disposición final; con lo cual cumplimos con unos de los objetivos de esta investigación.



**Figura 50.** Lodo residual del efluente industrial.

A. Lodo electrocoagulación

B. Lodo prueba físico química

En la figura 50 se aprecia que el lodo del proceso de electrocoagulación es mucho más compacto y con menos cantidad de agua que el lodo físico químico.

Para obtener datos referenciales de la humedad de lodo electro coagulado, se colocó una masa considerable de lodo en una capsula para observar sus características principales, para luego llevarlo a una estufa para su secado y determinar su porcentaje de agua.

Los resultados de la tabla 22, describe el porcentaje de humedad de lodos del efluente industrial tratado con electrocoagulación, que corresponden a las pruebas realizadas con las condiciones óptimas de tratamiento.

**Tabla 22.** Porcentaje de Humedad de Lodos

Condiciones Iniciales de la prueba		
pH= 7	Intensidad de corriente= 5 A	Tiempo = 15 min
Lodos	% de Humedad de Lodo	
Lodo 1	93.5	
Lodo 2	93.1	
Lodo 3	94.2	

Las imágenes comparativas que se presentan y los valores de porcentaje de humedad, nos indican que obtenemos un lodo de muy buenas características, las cuales son referenciales para futuras investigaciones.

#### 4.6 Evaluación económica del tratamiento

El costo de tratamiento en el proceso de electrocoagulación está asociado a dos factores principales que son el consumo de corriente eléctrica y la reposición de los electrodos después de su deterioro.

Según la bibliografía los costos para implementar el tratamiento con la electrocoagulación es viable económicamente, el consumo de energía es menor que el tratamiento físico químico y los electrodos de sacrificio son de bajo costo.

En esta investigación se instaló un medidor de amperaje que mide la corriente continua y adicionalmente un medidor de corriente alterna el cual nos permite obtener el consumo de energía de la red pública a la cual está conectada la fuente de poder para realizar el proceso de electrocoagulación con la celda. Para lo cual se realizó mediciones de amperaje y se tomaron valores de costo por Kwh suministrado por la empresa de energía vigente en el país. Otro aspecto a considerar es la reposición de los electrodos de fierro

y aluminio, el cual se cambian generalmente después de 6 meses y son costo bajo en el mercado.

El costo de tratamiento por electrocoagulación es menor que el convencional ya sea por el consumo de energía, si no también que no necesita adición de coagulantes y polímeros sintéticos, estos en un tratamiento convencional incrementan los costos de tratamiento.

El consumo de energía consumida por la celda de electrocoagulación se halló utilizando la relación formulada por Ramesh que mostramos a continuación: [20]

$$E = \frac{V.I}{Q.1000}$$

Dónde:

E: Energía consumida por volumen de efluente tratado en Kwh/m<sup>3</sup>

V: Voltaje aplicado, en V.

I: Corriente aplicada, en A.

t: Tiempo de tratamiento, en h.

Q: Volumen del efluente tratado, en m<sup>3</sup>.

1000: Coeficiente para conversión de W a KW.

La tabla 23 presenta los valores óptimos de operación obtenidos en el tratamiento del efluente de industria de pintura. Es bueno acotar que se eligió estos valores ya que la diferencia de porcentajes de remoción era mínima, optando por un amperaje de 5 amperios, dejando de lado utilizar 8 amperios ya que implicaría mayor consumo de energía.

**Tabla 23.** Parámetros óptimos en la evaluación económica

Parámetros	Valores
Voltaje (V)	3.5
Amperios(A)	5
Tiempo (min)	15
Volumen (L)	4.5

Luego realizando la conversión para el reemplazo en la fórmula del tiempo y volumen tenemos  $t = 0.25$  horas y  $V = 0.0045 \text{ m}^3$ , se obtiene el siguiente valor:

$$\text{Energía consumida} = 0.97 \text{ Kwh/m}^3$$

Si asumimos la tarifa cobrada por una de las empresas eléctricas que es **S/. 0.3729** por Kwh, nos arrojaría un costo de  $0.36 \text{ S/. / m}^3$ .

### Consumo de electrodos

Los electrodos utilizados como el aluminio y el fierro sufren un desgaste por disolución de los mismos en el proceso de electrocoagulación, el electrodo de sacrificio que en este caso fue el aluminio sufre una mayor pérdida de peso. Teniendo en consideración estos aspectos se midió el peso de los electrodos antes y después del tratamiento para calcular el costo (ver Tabla 24) en base a la reposición de los mismos.

**Tabla 24.** Calculo de costos de reposición de electrodos

Electrodos	Aluminio	Fierro
<b>Peso inicial (gr)</b>	83.381	226.373
<b>Peso final (gr)</b>	83.226	226.362
<b>Consumo (gr)</b>	0.155	0.011
<b>N° electrodos</b>	5	5
<b>Total consumo (gr)</b>	0.775	0.055
<b>Costo (gr)</b>	0.02	0.007
<b>Costo (S/.)</b>	0.0155	0.000385
<b>Costo Total (S/.)</b>	0.016	

#### 4.7 Diseño Experimental

El diseño experimental utilizado en la investigación es un diseño factorial de tres factores completamente al azar, con diferentes niveles y la variable de respuesta fue el porcentaje de remoción de DQO.

Las variables que se consideraron como factores para el diseño experimental fueron: intensidad de corriente eléctrica, pH del medio acuoso y tiempo de tratamiento, lo que permitió investigar el efecto individual y la interacción entre los factores sobre la variable respuesta, al elaborar un análisis de varianza, ANOVA con de la información obtenida.

El modelo estadístico utilizado para el análisis de la información fue:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Dónde,

$\mu$ : es el porcentaje medio de remoción de DQO del modelo.

$\alpha_i$ : es el efecto del i-ésimo nivel del factor tiempo. k = 5, 10 y 15 min.

$\beta_j$ : es el efecto del j-ésimo nivel del factor Intensidad de corriente= 3 ,5 y 8 A/m<sup>2</sup>

$\gamma_k$ : es el efecto del k-ésimo nivel del factor pH. i = 4, 7.12 y 10

$\alpha\beta_{ij}$ : es el efecto de interacción entre los niveles i y j de los factores tiempo y intensidad de corriente.  $\forall_{i,j}$

$\alpha\gamma_{ik}$ : es el efecto de interacción entre los niveles i y k de los factores pH y tiempo.  $\forall_{i,k}$

$\beta\gamma_{jk}$ : es el efecto de interacción entre los niveles j y k de los factores intensidad de corriente y pH.  $\forall_{j,k}$

$\alpha\beta\gamma_{ijk}$ : es el efecto de interacción entre los niveles i, j y k de los factores pH, intensidad de corriente y tiempo.  $\forall_{i,j,k}$

$y_{ijkl}$ : es la l-ésima observación del porcentaje de remoción de DQO observado en los niveles i, j y k de los factores pH, intensidad de corriente y tiempo.

$\varepsilon_{ijkl}$  : es el l-ésimo término de error aleatorio

**Tabla 25.** Análisis estadístico ANOVA de los datos experimentales

FV	SC	GL	CM	F	P
Tiempo	0.33394217	2	0.16697108	165.53	<0.0001
Intensidad	0.06724773	2	0.03362387	33.33	0.0001
pH	0.00309044	2	0.00154522	1.53	0.2733
Tiempo*Intensidad	0.01457003	4	0.00364251	3.61	0.0576
Tiempo*pH	0.00439632	4	0.00109908	1.08	0.4232
Intensidad*pH	0.00982808	4	0.00245702	2.43	0.1320
Error	0.00806955	8	0.00100869		
Total	0.44114431	26	0.01696709		

Se realizó el análisis de los datos que se observan en la tabla 25, en donde se encontró un coeficiente de correlación  $r^2$  de 0.98170, lo que significa que el modelo estadístico propuesto explica el 98.17% de la variabilidad de la proporción de remoción de DQO, lo cual indica un buen ajuste del modelo a los datos recolectados.

Respecto a las de significatividad de los efectos principales y de la iteración; se obtuvieron valores para  $p < 0,05$  con el factor tiempo y factor intensidad de corriente lo cual indica que estos son significativos en la remoción de la DQO. Mientras que el factor pH y todas las iteraciones resultaron no significativos en la remoción de la DQO.



## CONCLUSIONES

- El tratamiento de aguas residuales industriales con electrocoagulación es un proceso efectivo para la remoción de contaminantes, siendo una alternativa viable para su aplicación en el país.
- Se determinó que las variables de mayor incidencia en el proceso son la intensidad de corriente, tiempo de retención, pH y espaciamiento entre las placas. Con respecto a la conductividad estuvo en un valor óptimo, permitiendo una buena densidad de corriente en el efluente tratado.
- Las pruebas realizadas en laboratorio nos permiten concluir que las mejores condiciones para obtener una alta eficiencia en la remoción de DQO en el tratamiento de las aguas residuales de la industria de pintura son a un pH natural del agua de 7.12, una intensidad de corriente de 5 amperios y un tiempo de tratamiento de 15 minutos; con los que se obtiene en promedio una eficiencia del 87%.
- Es importante señalar que al utilizar intensidades de corriente de 8 amperios con pH =7,12 y pH= 4 se observó una eficiencia 90% y siendo esta diferencia mínima; se descartó ya que influiría en un aumento de costos por el gasto de energía y aditivos para disminuir el pH.
- Otro aspecto importante de este estudio fue la calidad de los lodos producido en el tratamiento, confirmándose lo dicho en la bibliografía que son muchos más compactos y secos que un lodo físico químico o biológico, permitiendo así una mejor disposición de los mismos.

- El costo para tratar un efluente por el proceso de electrocoagulación es bajo por el menor consumo de energía y la reposición de los electrodos de sacrificio por su desgaste se realiza generalmente dos veces al año.

## RECOMENDACIONES

- Por los resultados del lodo obtenido en este proceso, se recomienda profundizar en análisis de su composición biológica y química que permita plantear nuevas investigaciones referidas a este tema en particular.
- En este estudio no se probó con configuraciones bipolares en serie y según algunos artículos pueden disminuir el consumo de energía, por lo cual se sugiere hacer pruebas para su verificación.
- En las pruebas de laboratorio se utilizó como material para los electrodos el aluminio y el fierro, por lo cual se recomienda realizar pruebas con otros materiales como acero inoxidable, cobre, etc.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Andía, C. (2000). Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Tratamiento De Agua: Coagulación Floculación. SEDAPAL, Lima.
2. Arango, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación ,1(2), 49-56.
3. Banco Interamericano de Desarrollo (1997). Manual de caracterización de aguas residuales industriales [versión DX Reader]. Recuperado de <https://www.dropbox.com/s/jprb4stsj3rkbgs/MANUAL%20DE%20CA RACTERIZACION%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20INDU STRIALES.pdf?dl=0>
4. Barrenechea, A. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual I, Capitulo 1-4, CEPIS, Lima.
5. Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology, 38(1), 11–41.
6. García, F., Callejas, J., Reyes, V. & Marmolejo Y. (2012). Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lactosuero residual. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales.
7. Holt, Peter K., Barton, Geoffrey W. & Mitchell, Cynthia A. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. Chemosphere. 59(3), 355–367.
8. Metcalf & Eddy. (1996). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. (3a. ed). México: Mc Graw Hill.

9. Mollah, M. & Yousuf, A. (2001). Electrocoagulation (EC) Science and applications: Journal of Hazardous Materials. 84(1), 29–41.
10. Mollah, M. & Morkovsky, P. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. 114(1-3), 199-210.
11. Martínez, N. (2007). Tratamiento de Aguas Residuales Industriales Mediante Electrocoagulación y Coagulación Convencional. Tesis Ingeniería Química, Universidad De Castilla La Mancha.
12. Restrepo, A., Arango, A. & Garcés, gL. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Producción + Limpia, 1 (2), 58-77.

## ANEXOS



## UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

### FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

LABORATORIO DE INVESTIGACION DEL AGUA

#### INFORME DE ANÁLISIS N°325 - 2012- LIA-FIA

Solicitante : UNIVERSIDAD DE LIMA – EDUAR AGUILAR ASCON.  
 Proyecto : Proyecto de Investigación  
 Tipo de muestra : Desagüe Industrial (\*)  
 Procedencia : Industria de Pintura  
 Fecha de muestreo : 07-12-2012 Hora: El solicitante no indicó  
 Fecha de recepción : 18-12-2012

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	METODO
Conductividad	μs/cm	2 930.00	Electrodos
Color	U.C.	16 300.00	Colorimétrico
DQO	mg/L	3 920.00	Volumétrico
DBO <sub>5</sub>	mg/L	1250.00	Winkler
pH	-----	7.12	Electrodo
Sólidos Suspendidos totales	mg/L	1 298.00	Gravimétrico
Turbiedad	U.N.T	1 919.00	Turbidímetro

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	METODO
Coliformes Fecales	NMP/100ML	20x10 <sup>3</sup>	Tubos Múltiples

Los análisis se han efectuado tomando los MÉTODOS NORMALIZADOS PARA EL ANÁLISIS DE AGUAS POTABLES Y RESIDUALES APHA –AWWA-WPCF 19 edición.

30 de Diciembre del 2012

Ing. Valer B. Mautino Cano  
 Jefe del Laboratorio de Investigación del Agua  
 Facultad de Ingeniería Ambiental -UNI

La muestra fue tomada por el solicitante.



## UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

### FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

#### LABORATORIO DE INVESTIGACION DEL AGUA

#### INFORME DE ANÁLISIS N°324 - 2012- LIA-FIA

Solicitante : UNIVERSIDAD DE LIMA – EDUAR AGUILAR ASCON.  
 Proyecto : Proyecto de Investigación  
 Tipo de muestra : Desagüe Industrial (\*)  
 Procedencia : Efluente de Industria de Pinturas  
 Fecha de muestreo : El Solicitante no indicó Hora: El solicitante no indicó  
 Fecha de recepción : 30-12-2012 PH: 7

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS FISICO QUIMICO

##### Referencia:

M1: EP7-1 M6:EP7-6  
 M2: EP7-2 M6:EP7-7  
 M3: EP7-3 M6:EP7-8  
 M4: EP7-4 M6:EP7-9  
 M5: EP7-5

PARÁMETRO	UNIDAD	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	METODO
D.Q.O	mg/L	1140	750	420	1700	1030	510	2030	1250	680	Colorimétrico

Los análisis se han efectuado tomando los MÉTODOS NORMALIZADOS PARA EL ANÁLISIS DE AGUAS POTABLES Y RESIDUALES APHA –AWWA-WPCF 19 edición.

  
 Lima, 7 de Enero del 2013  
 Jefe (e) Lab. de Investigación del Agua  
 Facultad de Ingeniería Ambiental -UNI

La muestra fue tomada por el solicitante.





## UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

### FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

LABORATORIO DE INVESTIGACION DEL AGUA

#### INFORME DE ANÁLISIS N°021 - 2013- LIA-FIA

Solicitante : UNIVERSIDAD DE LIMA – EDWAR AGUILAR ASCON.  
 Proyecto : Proyecto de Investigación  
 Tipo de muestra : Desagüe Industrial (\*)  
 Procedencia : Efluente de Industria de Pinturas  
 Fecha de muestreo : 18-01-2013 Hora :11:00 a.m.  
 Fecha de recepción : 22-01-2013 PH: 4

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS FISICO QUIMICO

##### Referencia:

M1: EP4-1 M6:EP4-6  
 M2: EP4-2 M7:EP4-7  
 M3: EP4-3 M8:EP4-8  
 M4: EP4-4 M9:EP4-9  
 M5: EP4-5

PARÁMETRO	UNIDAD	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	METODO
D.Q.O	mg/L	1350	930	400	1370	950	550	1900	1200	750	Colorimétrico

Los análisis se han efectuado tomando los MÉTODOS NORMALIZADOS PARA EL ANÁLISIS DE AGUAS POTABLES Y RESIDUALES APHA –AWWA-WPCF 19 edición.



Lima, 01 de Febrero del 2013

Dra. Valery R Mautino Cano  
 Jefe (e) Lab. de Investigación del Agua  
 Facultad de Ingeniería Ambiental -UNI

La muestra fue tomada por el solicitante.



## UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

### FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL LABORATORIO DE INVESTIGACION DEL AGUA

#### INFORME DE ANÁLISIS N°022 - 2013- LIA-FIA

Solicitante : UNIVERSIDAD DE LIMA – EDUAR AGUILAR ASCON.  
 Proyecto : Proyecto de Investigación  
 Tipo de muestra : Desagüe Industrial (\*)  
 Procedencia : Efluente de Industria de Pinturas  
 Fecha de muestreo : 18-01-2013 Hora: 12:00 p.m.  
 Fecha de recepción : 22-01-2013 PH: 10

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

##### Referencia:

M1: EP10-1 M6: EP10-6  
 M2: EP10-2 M7: EP10-7  
 M3: EP10-3 M8: EP10-8  
 M4: EP10-4 M9: EP10-9  
 M5: EP10-5

PARÁMETRO	UNIDAD	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	METODO
D.Q.O	mg/L	1500	1100	520	1300	980	490	2200	1600	560	Colorimétrico

Los análisis se han efectuado tomando los MÉTODOS NORMALIZADOS PARA EL ANÁLISIS DE AGUAS POTABLES Y RESIDUALES APHA –AWWA-WPCF 19 edición.

Lima, 01 de Febrero del 2013

  
 Ing. Valery R Mautino Cano  
 Jefe (e) Lab. de Investigación del Agua  
 Facultad de Ingeniería Ambiental -UNI

La muestra fue tomada por el solicitante.

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INDECOPI – SNA CON REGISTRO N° LE - 002**



Registro N° LE-002

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1303657**

Página 1 de 6

A solicitud de:	UNIVERSIDAD DE LIMA		
Dirección:	AV. JAVIER PRADO ESTE NRO. 4800 URB. FUNDO MONTEPRADO CHICO - LIMA - SANTIAGO DE SURCO		
Solicitud de Ensayo:	ENV / LB-320122-001	Cantidad Muestras:	2
Muestreo realizado por:	CLIENTE	Fecha de Recepción a SGS:	14-02-2013 11:15
Procedencia:	EFLUENTE INDUSTRIAL PINTURA		

<b>Análisis</b>	<b>Método</b>
ICP Masa Total	EPA 200.8: 1994 Rev 5.4 Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry.

Emitido en Callao-Perú el , 20/02/2013

Rocio J. Manrique Torres  
CIP 136634

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INDECOPI – SNA CON REGISTRO N° LE - 002**



Reglamento N° 17.2012

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1303657**

Página 2 de 6

**ICP Masa Total**

Matriz  
Producto descrito como  
Identificación de Muestra  
Fecha de muestreo

	L.D.	AQUA RESIDUAL	AQUA RESIDUAL
		EFUENTE	EFUENTE
		EP-1: Efuyente Crudo 13-02-2013 11:00	EP-2: Efuyente Tratado 13-02-2013 11:10
Aluminio Total (mg/L)	0.02	0.39	7.00
Antimonio Total (mg/L)	0.0008	<0.0008	<0.0008
Arsenico Total (mg/L)	0.001	0.004	0.001
Bario Total (mg/L)	0.002	0.120	0.010
Berilio Total (mg/L)	0.0001	<0.0001	<0.0001
Bismuto Total (mg/L)	0.00005	<0.00005	<0.00005
Boro Total (mg/L)	0.01	0.40	0.33
Cadmio Total (mg/L)	0.0002	0.0005	<0.0002
Calcio Total (mg/L)	0.003	117.264	61.787
Cerio Total (mg/L)	0.00008	0.00090	<0.00008
Cesio Total (mg/L)	0.0001	0.0067	0.0084
Cobalto Total (mg/L)	0.00007	0.00203	0.00085
Cobre Total (mg/L)	0.001	0.020	0.006
Cromo Total (mg/L)	0.002	0.006	<0.002
Estafio Total (mg/L)	0.0014	<0.0014	<0.0014
Estroncio Total (mg/L)	0.0003	1.1786	0.6764
Fósforo Total (mg/L)	0.2	16.6	0.2
Galio Total (mg/L)	0.00004	0.00021	0.00125
Germanio Total (mg/L)	0.0002	<0.0002	<0.0002
Hafnio Total (mg/L)	0.00005	0.01922	0.00048
Hierro Total (mg/L)	0.001	1.019	0.412

**Notas:**

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

(\*) El método indicado no ha sido acreditado por el INDECOPI-SNA, para la matriz en mención.

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INDECOPI – SNA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1303657**

Página 3 de 6

**ICP Masa Total**

		AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
		EFLUENTE	EFLUENTE
		EP-1: Efluente Crudo 13-02-2013 11:00	EP-2: Efluente Tratado 13-02-2013 11:10
Lantano Total (mg/L)	0.0005	<0.0005	<0.0005
Lito Total (mg/L)	0.0009	0.1704	0.1585
Lutecio Total (mg/L)	0.00002	<0.00002	<0.00002
Magnesio Total (mg/L)	0.001	17.448	8.750
Manganeso Total (mg/L)	0.0006	0.0535	0.2579
Mercurio Total (mg/L)	0.00004	<0.00004	<0.00004
Molibdeno Total (mg/L)	0.00014	0.00143	<0.00014
Niobio Total (mg/L)	0.0005	<0.0005	<0.0005
Niquel Total (mg/L)	0.001	0.007	0.122
Plata Total (mg/L)	0.0002	0.0008	<0.0002
Plomo Total (mg/L)	0.0004	0.1438	0.0016
Potasio Total (mg/L)	0.2	6.9	5.9
Rubidio Total (mg/L)	0.0003	0.0210	0.0201
Selenio Total (mg/L)	0.002	<0.002	<0.002
Silicio Total (mg/L)	0.05	12.40	0.80
Sodio Total (mg/L)	0.02	575.54	568.35
Talio Total (mg/L)	0.00003	<0.00003	<0.00003
Tantalo Total (mg/L)	0.0007	<0.0007	<0.0007
Teluro Total (mg/L)	0.001	<0.001	<0.001
torio Total (mg/L)	0.00006	<0.00006	<0.00006
Titanio Total (mg/L)	0.01	0.08	<0.01
Urano Total (mg/L)	0.00004	0.00081	<0.00004

**Notas:**

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

(\*) El método indicado no ha sido acreditado por el INDECOPI-SNA, para la matriz en mención.

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INDECOPI – SNA CON REGISTRO N° LE - 002**

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1303657**



Registros N° 17.002

Página 4 de 6

**ICP Masa Total**

		AQUA RESIDUAL	AQUA RESIDUAL
		EFUENTE	EFUENTE
		EP-1: Efluente Crudo 13-02-2013 11:00	EP-2: Efluente Tratado 13-02-2013 11:30
Vanadio Total (mg/L)	0.002	<0.002	<0.002
Wolframio Total (mg/L)	0.0002	<0.0002	<0.0002
Yterbio Total (mg/L)	0.00002	<0.00002	<0.00002
Zinc Total (mg/L)	0.001	0.377	0.029
Zirconio Total (mg/L)	0.00015	0.01423	0.00093